



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

EMISE TZL PŘI SPALOVÁNÍ AGROPELET

SOLID PARTICLE EMISSIONS FROM AGROPELLETS COMBUSTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marek Svoboda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Lisý, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Marek Svoboda**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Energetika, procesy a životní prostředí
Vedoucí práce: **Ing. Martin Lisý, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Emise TZL při spalování agropelet

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V posledních letech se rozšířilo spalování tzv. agropelet v domovních kotlech. Spalování těchto paliv se však vyznačuje vysokou produkcí emisí TZL. Práce bude zaměřena na stanovení základní palivové charakteristiky agropelet, definování optimální spalovacích podmínek a experimentální ověření tvorby TZL při spalování agropelet.

Cíle bakalářské práce:

- Provést rešerši vlastností agropelet jako paliva a podmínek spalování.
- Stanovit optimální podmínky spalování.
- Experimentálně ověřit produkci emisí pro různé druhy agropelet.

Seznam literatury:

BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 9788021447707.

PASTOREK, Zdeněk, Jaroslav KÁRA a Petr JEVIČ. Biomasa: obnovitelný zdroj energie. Praha: FCC Public, 2004. ISBN 80-86534-06-5.

MALATĚK, Jan a Petr VACULÍK. Biomasa pro výrobu energie. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008. ISBN 978-80-213-1810-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 27. 10. 2016



doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce se dělí na dvě části. První část se zabývá vymezením hlavních pojmů, vlastnostmi biomasy a pelet. Dále jsou zmíněny postupy při měření vlastností agropelet dle platných norem. Následuje vybrání hlavních materiálů pro výrobu agropelet s určením jejich vlastností. Teoretickou část uzavírá řešerše emisí vzniklých při spalování a stanovení emisních limitů pro kotle na tuhá paliva. Druhá část je experimentální, v níž se stanovuje vznik tuhých znečišťujících látek při spalování čtyř druhů pelet, vyrobených z alternativních zdrojů. Dále se zde nachází grafy průběhu plyných emisí každého z nich. Závěrem potom je porovnání agropelet s více rozšířeným dřevem.

Klíčová slova

Agropelety, pelety, biomasa, měření, TZL, prach, emise, kotle, limity, alternativní, sláma, spalování, znečišťování, popel, popílek

Abstract

This thesis is divided into two parts. The first part deals with defining the main concepts, properties of biomass and pellets. Further, the procedures for measuring agropellets properties according to valid standards are mentioned. The following is a selection of the raw materials for the production of agropellet, with the determination of their properties. The theoretical part closes background research emissions from combustion and emission standards for a solid fuel boiler. The second part is an experimental one, which determines the formation of solid pollutants in combustion of four types of pellets made from alternative sources. Here are the graphs of the gaseous emissions of each of them. At last there will be a comparison of emissions agro pellets with more widespread wood pellets.

Keywords

Agropellets, pellet, biomass, measurement, TSP, dust, emissions, boiler, limit, alternative, straw, combustion, pollution, ash

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SVOBODA, M. Emise TZL při spalování agropelet. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 59 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Lisý, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Martina Lisého, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 20. května 2017

.....
Marek Svoboda

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat všem, kdo se podíleli na tvorbě této práce, ať už přímo nebo nepřímo. Jedná se především o moji rodinu, která mi poskytuje zázemí po celou dobu mého studia na vysoké škole.

Za odbornou pomoc a cenné rady chci poděkovat svému vedoucímu Ing. Martinu Lisému, Ph.D. dále potom Ing. Otakaru Štelcovi za pomoc při experimentální části této práce.

Obsah

1 Úvod	11
2 Vymezení pojmů	12
2.1 Biomasa	12
2.1.1 Způsoby využití biomasy k energetickým účelům.....	12
2.2 Pelety	13
2.3 Agropelety	13
2.4 Hrubý a elementární rozbor paliv	14
3 Vlastnosti agropelet	14
3.1 Vlhkost paliva	14
3.2 Výhřevnost paliva	15
3.3 Hořlavina v palivu	16
3.4 Popelovina v palivu	16
3.5 Teplota tavení popele	17
3.6 Stanovení obsahu prvků.....	18
3.7 Chlór a síra v palivu.....	18
4 Vybrané druhy agropelet	20
4.1 O palivu EKOVER	20
4.2 Pšenice ozimá	21
4.3 Řepka	23
4.4 Šťovík	23
4.5 Kukuřice.....	24
4.6 Seno	25
4.7 Bílé dřevo.....	26
4.8 Porovnání hlavních vlastností	26
5 Kotle na tuhá paliva, emise, imise a jejich limity.....	27
5.1 Hlavní znečišťující látky při spalování	27
5.2 TZL	28
5.2.1 Měření z laboratoře Poznan University of Technology	28
5.2.2 Měření na německém kotli Heizomat RHK-AK 50.....	28
5.2.3 Měření v dánském technologickém institutu	28
5.2.4 Měření v Praze na kotli VERNER A25	29

5.2.5 Diskuze	29
5.3 Produkce emisí v ČR.....	30
5.4 Legislativa emisních tříd kotlů	31
6 Experimentální část.....	33
6.1 Hrubý rozbor paliv	33
6.1.1 Vlhkost pelet.....	33
6.1.2 Popelnatost pelet.....	34
6.1.3 Spalné teplo a výhřevnost pelet	36
6.2 Optimální podmínky spalování	36
6.3 Měření produkce TZL agropelet na kotli VERNER A251.1	38
6.3.1 Popis experimentu	38
6.4 Vyhodnocení emisí jednotlivých měřených paliv	42
6.4.1 Pelety ze sena.....	42
6.4.2 Pelety z řepky	44
6.4.3 Pelety z pšenice.....	45
6.4.4 Pelety ze semínek (řepky, slunečnice, hořčice, plevy)	47
6.5 Porovnání emisí měřených paliv společně se dřevem.....	48
Závěr	52
Seznam použitých zdrojů	53
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	56
Seznam obrázků	57
Seznam tabulek	58
Seznam grafů.....	59

1 Úvod

Biomasa v dnešním světě zaujímá čím dál větší zastoupení v oblasti energetiky, tj. výroby elektřiny a tepla. Mezi nejvýznamnější typ biomasy je známo dřevo. Do velkého potenciálu, který biomasa nabízí, však nepatří pouze dřevo, ale najdou se zde další typy jako vedlejší produkty zemědělské prvovýroby. Do nichž lze zahrnout slámu obilovin a řepky vedlejší produkty čištění obilí, rychle rostoucí byliny, trvalé travní porosty, dále pak čistírenské kaly aj.

V České republice biomasa získaná z orné půdy má energetické využití v průměru 64,6 PJ/rok (40 %), z trvale travních porostů 26,1 PJ/rok (16%) a vedlejší odpadních produktů 70,7 PJ/rok (44 %). Z těchto čísel plyne, že biomasa těchto uvedených alternativních zdrojů může sehrát velkou roli v oblasti tepla pro domácnost a vyřešení některých environmentálních problémů. Biomasa se jako taková považuje za CO₂ neutrální, tzn., že za období svého růstu naakumuluje tolik oxidu uhličitého, kolik při svém spalení vydá do okolí [1].

Tato práce bude zaměřena právě na výrobu tepla v domácích topeništích a s tím spojeným problémem vzniku emisí prachu (TZL). Hlavním tématem bude, jestli dobře cenově dostupné alternativní palivo zbytků zemědělské prvovýroby (agropelety) splní zpřísnující se emisní limity na tuhé znečišťující látky odcházejících ze spalovacího zařízení. Tomuto však bude nejprve předcházet rozbor některých druhů agropelet, porovnání jejich vlastností a vhodnosti použít je jako zdroj paliva pro domácnost.

2 Vymezení pojmů

2.1 Biomasa

Biomasa se podle směrnice evropského parlamentu a rady 2009/28/ES rozumí biologicky rozložitelná část produktů, odpadů a zbytků biologického původu ze zemědělství (včetně rostlinných a živočišných látek), z lesnictví a souvisejících průmyslových odvětví včetně rybolovu a akvakultury, jakož i biologicky rozložitelná část průmyslových a komunálních odpadů [2]. Biomasu podle původu můžeme rozdělit do tří hlavních kategorií:

- 1) Rostlinná biomasa, dále se dělí na:
 - Dendromasu - dřevní biomasa
 - Fytomasu - jednoroční rostliny a víceroční rostliny
- 2) Živočišná biomasa-Zoomasa
- 3) Komunální a průmyslové odpady

Další rozdělení může být:

- A) Biomasa záměrně pěstovaná k tomuto účelu: cukrová řepa, obilí, brambory, cukrová třtina, olejnin (nejvýznamnější z nich je řepka olejná), energetické dřeviny (vrby, topoly, olše, akáty)
- B) Biomasa odpadní
 - Rostlinné zbytky ze zemědělské prvovýroby
 - Odpady z živočišné výroby
 - Komunální organické odpady z venkovních sídel
 - Organické odpady z potravinářských a průmyslových výroby
 - Lesní odpady [3, s. 18]

Podrobným rozdělením se zabývá vyhláška č. 477/2012 Sb. [4].

2.1.1 Způsoby využití biomasy k energetickým účelům

Energii z biomasy lze získávat několika způsoby. Důležitý parametr je vlhkost, která nám určuje množství sušiny v biomase obsažené. Pod hranici 50 % sušiny se hovoří o mokrých procesech, naopak nad hranicí 50 % se hovoří o suchých procesech. Principiálně lze pak získávání energie z biomasy a její přípravy rozdělit takto:

- A) Termochemická přeměna (suchý proces)
 - spalování
 - zplyňování
 - pyrolýza
- B) Biochemická přeměna (mokrá proces)
 - alkoholové kvašení
 - metanové kvašení
- C) Fyzikální a chemická přeměna (například: briketování a peletování)
- D) Získávání odpadního tepla při zpracování biomasy (např. kompostování) [3, s. 19]

2.2 Pelety

Pojmem peleta se rozumí tuhý produkt biomasy zpravidla granule kruhového průřezu o 6 až 14 mm a délce 1 až 5 cm, zhotovený lisováním při velkých tlacích na protlačovacích matricích. Vlivem velkých tlaků se protlačovaná biomasa zahřívá až na teplotu 100 °C, přičemž se z ní uvolňuje lignin. Lignin plní funkci přírodního pojiva, k dosažení velké pevnosti pelet se může přidávat 1-3 % škrobu, melasy nebo kukuřičné mouky. Další funkce ligninu je, že po vychladnutí vytvoří na peletě tvrdý průsvitný povlak a zabrání tak vnikání případné vlhkosti během skladování a expedici pelet. Nejčastěji používaným materiálem pro výrobu pelet jsou dřevěné piliny jako odpadní produkt dřevozpracujícího průmyslu. Piliny však nejsou jedinou surovinou pro výrobu pelet. Dalšími materiály jsou: lesní kůra, lesní štěrka, rychle rostoucí dřeviny, ze sběrového papíru nebo například ze slámy a stébelnin. Posledním třem se může také říkat alternativní pelety resp. agropelety [5, s. 10,19].



Obrázek 1 Ukázka dřevních pelet [6]

2.3 Agropelety

Alternativní pelety neboli agropelety se vyrábí stejným způsobem jako klasické dřevní pelety. Vyrábí se lisováním zemědělských komodit, tj. energetických rostlin, řepkové slámy, obilné slámy, odpadů po čištění obilnin a olejnin, sena apod. dále mezi agropelety řadíme i pokrutiny, které vznikají při lisování řepkového a slunečnicového oleje [7].

2.4 Hrubý a elementární rozbor paliv

Hrubý rozbor určuje poměr mezi hořlavinou (h), popelovinou (A^r) a vodou (W^r) obsaženými v palivu. Elementární rozbor potom určuje poměrné obsahy prvků v hořlavině [8, s. 15].

Tabulka 1 Hrubý rozbor paliva před a po spálení [3, s. 72]

Složení surového paliva před spálením				
celková voda		popeloviny	hořlavina	
voda povrchová	voda hygroskopická	křemičitany vápníku a hliníku, uhličitany hořčíku a železa, oxid křemičitý, pyrit atd.	tuhá hořlavina	prchavá hořlavina
			uhlík, vodík, síra, dusík, kyslík	

Stav po spálení paliva ve skutečném ohništi				
plynné zbytky z vody		tuhé zbytky z popelovin		plynné zbytky z hořlaviny
vodní pára		škvára	popílek	složky kouřových plynů
		oxid křemičitý, hlinitý, vápenatý, železnatý, draselný, sodný atd.		oxid uhličitý, siřičitý, oxid dusíku, oxid uhelnatý a vodík, vzdušný kyslík a dusík, vodní pára

3 Vlastnosti agropelet

Z hlediska použití jakéhokoliv paliva nás zajímají jeho palivové vlastnosti, které at' už pozitivně či negativně ovlivňují hoření. Do těchto vlastností patří zejména: obsah vody a popele, dále obsah prchavé i neprchavé hořlaviny. Výhřevnost, popřípadě spalné teplo. Obsah prvků, které se účastní hoření, u alternativních paliv s důrazem na obsah síry a chlóru. Mezi vlastnosti agropelet můžeme zahrnout také charakteristické teploty tavení popele.

3.1 Vlhkost paliva

Voda je obsažena ve většině tuhých paliv, výjimkou není ani biomasa. Je nežádoucí – snižuje výhřevnost paliva a je zdrojem řady potíží při dopravě, skladování a při samotném hoření paliva. Voda odchází se spaliny ve formě vodní páry a zvětšuje tak objem spalin. Při spalování absorbuje část uvolněného tepla a snižuje spalovací teplotu, dále zvyšuje komínovou ztrátu, jinými slovy snižuje účinnost kotle. Při poklesu teploty spalin pod hranici rosného bodu urychluje korozi kotle ze strany spalin [8, s. 15].

Voda může být v biomase vázána několika způsoby:

- A) **Voda chemicky vázaná** – je součástí chemických sloučenin. Nelze ji z biomasy odstranit sušením, ale pouze spálením, proto je v biomase zastoupena i při nulové absolutní vlhkosti. Zjišťuje se při chemických analýzách paliva a její celkové množství představuje 1–2 % sušiny. Při charakteristice fyzikálních a mechanických vlastností nemá žádný význam.
- B) **Voda vázaná (hygroskopická)** – nachází se v buněčných stěnách a je vázána vodíkovými můstky na hydroxilové skupiny OH amorfni části celulózy a hemicelulóz. Voda vázaná se v palivu vyskytuje při vlhkostech 0–30 %. Při charakteristice fyzikálních a mechanických vlastností má největší a zásadní význam.
- C) **Voda volná (kapilární)** – vyplňuje v palivu lumeny buněk a mezibuněčné prostory. Při charakteristice fyzikálních a mechanických vlastností má podstatně menší význam než voda vázaná.

Problém měření vlhkosti biomasy však spočívá v tom, že obsah vlhkosti je velice různý a navíc se vlivem okolního prostředí (vzdušná vlhkost, teplota, tlak) v čase mění. Okamžité měření vlhkosti biomasy není z hlediska provozu zařízení spalujících biomasu nutností, ale velkou výhodou.

Pro úplnost budou uvedeny i současné metody měření vody v biomase:

- 1) **Stanovení vlhkosti oddělením vody od pevné fáze** - jedná se o metody přímé - váhovou (gravimetrickou) a destilační.
- 2) **Stanovení vlhkosti na základě specifických vlastností vody** - odezva některých chemických reakcí (metoda K. Fischera, metoda karbidu vápníku); pohltivost elektromagnetického záření vysokých frekvencí.
- 3) **Měření jiných veličin v souvislosti s obsahem vody** - metody zaměřené na změnu elektrických vlastností materiálu (odporové, kapacitní, indukční) metody zaměřené na změnu tepelných vlastností materiálu (změna součinitele tepelné vodivosti) [9].

3.2 Výhřevnost paliva

Výhřevnost Q_i^r (MJ.kg⁻¹) je teplo uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na 20 °C, přičemž voda ve spalinách zůstane v plynné fázi.

Výhřevnost lze stanovit výpočtem ze změřeného spalného tepla Q_s . Spalné teplo se určuje v kalorimetrech. Spalné teplo se liší od výhřevnosti tím, že voda ve spalinách zkondenzuje, tudíž se nachází v kapalné fázi. Spalné teplo je větší než výhřevnost. V našich podmínkách se počítá s výhřevností, neboť z důvodů koroze mají spaliny většiny kotlů teplotu nad rosným bodem a vodu v plynné fázi [8, s. 17].

Vzorec pro výpočet výhřevnosti:

$$Q_i^r = Q_s - r \cdot (W^r + 8,94 \cdot H_2) \quad (1)$$

Kde W^r - voda obsažená v palivu

r – výparné kondenzační teplo vody, $r = 2454 \text{ kJ.kg}^{-1}$

H_2 - obsah vodíku v surovém palivu (z 1 kg vodíku vznikne 8,94 kg vody)

Výhřevnost paliv se může pohybovat v určitém rozmezí, kde nejvíc závisí na původu plodiny, typu skladování a obsahu vody v palivu.

3.3 Hořlavina v palivu

V tuhých palivech nacházíme hořlavinu ve dvou formách. Tzv. prchavá hořlavina se dá zjednodušeně definovat jako plyn, který se z paliva uvolňuje při jeho zahřátí na určitou teplotu a vnějším projevem jejího spalování je plamen. Neprchavý zbytek (pevný podíl hořlaviny) je hořlavina, která v palivu zůstane po uvolnění prchavé hořlaviny. Je tedy vázán v pevném zbytku paliva, což je již „odplyněné“ palivo obsahující vedle pevného podílu hořlaviny také popeloviny. Vnější projevem hoření neprchavého zbytků je žhnutí. Čím starší je palivo, tím nižší má podíl prchavé hořlaviny. Proto například několik měsíců „stará“ sláma má větší podíl prchavé hořlaviny, než několik let rostoucí dřevo. U biomasy, která má největší podíl prchavé hořlaviny, se běžně, ale bohužel nepřesně, zaměňují pojmy spalování a zplyňování. Tato nepřesnost je vyvolána skutečností, že proces hoření tuhého paliva vždy prochází zplyňovací fází, která poté přechází do fáze spalování. Velký obsah prchavé hořlaviny v biomase tyto fáze zvyrazňuje [10, s. 11].

3.4 Popelovina v palivu

Jedná se o minerální látky (křemičitany, uhličitany, sírany a další) obsažené v tuhém palivu před jeho spálením. Spálením vzniká z popeloviny tuhý zbytek, kterému říkáme popel [8, s. 16].

V České republice převládá technologie spalování biomasy na roštu. Technické problémy související se spalováním biomasy jsou způsobeny většinou nízkou spalovací teplotou a vysokým zastoupením alkalických kovů (zejména draslíku) v biomase, které společně s chlorem, křemíkem a vápníkem způsobují slinování, aglomeraci a spékání popelů, zanášení kotle, erozi a také emise prachu a kovů. Množství popela v palivech z biomasy se průměrně pohybuje v rozmezí 1–10 %. Dřevo obvykle obsahuje relativně nižší množství popela (0,5–2,5 %), zatímco výrazně vyšší hodnoty nalézáme v kůře (3–4 %), slámě (5 %) nebo trávách (nad 5 %).

V zařízeních na spalování biomasy můžeme obvykle rozlišit 2 hlavní druhy popelů: roštový a úletový. Chemické složení a množství popelů z biomasy se odvíjejí nejen od typu spalované biomasy, druhu rostliny nebo její části, růstových podmínek, stáří rostliny, ale částečně i od použitých hnojiv a pesticidů, doby a techniky sklizně, znečištění, spalovacích podmínek, spalovací technologie a skladování.

V dnešní době se zvyšující se spotřebou biomasy na výrobu energie vzniká i větší množství popele, pro který se hledá efektivní využití v podobě hnojiv. Tento problém však není obsahem této práce [11].

Stanovení obsahu popele

Znalost obsahu popela umožňuje zjistit zbytek biopaliva po spálení. Podle charakteru popela lze usuzovat na vznik nánosů a na charakter popelovin. Po rozpuštění popela lze v něm stanovit obsah prvků.

Obsah popela je u dřevních pelet normalizován do 0,50 %, avšak hodnota obsahu popela se mění v závislosti na druhu použité biomasy a pro nedřevní biomasu se může pohybovat až do 10 i více procent. Z tohoto pohledu je nutno také zvážit použití daného biopaliva do daného druhu spalovacího zařízení, aby nedošlo k jeho poškození (např. nalepení popela na keramické mřížky apod.).

Podstatou metody je navážení vzorku a jeho vyžhání v muflové peci na teplotě 550 °C až do konstantní hmotnosti. Zbytek, který zůstane v kelímku, se uvádí v procentech hmotnosti [12].

3.5 Teplota tavení popele

S rozvojem využívání alternativních biopaliv rostlinného původu se objevil problém se spékáním popelů těchto materiálů v prostoru ohniště a jejich nalepováním na teplosměnných plochách. Je zřejmé, že za problémem stojí nízké charakteristické teploty tavitelnosti popele (TTP) těchto paliv. Problémem rostlinných popelovin jsou volné oxidy (CaO, Na₂O, K₂O) a chloridy, které výrazně snižují body tání [13].

Tabulka 2 Vliv prvků na charakteristické teploty popele [14]

Prvky zvyšující charakteristické teploty popele	
oxid křemičitý	SiO ₂
oxid hlinitý	Al ₂ O ₃
Prvky snižující charakteristické teploty popele	
oxid železitý	Fe ₂ O ₃
oxid hořečnatý	MgO
oxid titaničitý	TiO ₂
oxid vápenatý	CaO
oxid fosforečný	P ₂ O ₅
oxid sírový	SO ₃
oxid mangangato-manganitý	Mn ₃ O ₄
oxid sodný	Na ₂ O
oxid draselný	K ₂ O

Eutektika aluminosilikátů tvořících popelovinu uhlí leží nad teplotou 1200 °C, zatímco eutektika rostlinných popelovin leží při daleko nižších teplotách. Eutektické teploty pro směsi alkalických kovů spolu s oxidem křemičitým nebo fosforečným mají nízké body tání.

Charakteristické TTP jsou čtyři a jedná se o teplotu sintrace t_s (spékání, smršťování tělíska), měknutí t_a (deformace, lepení, počátek měknutí tělíska), tání t_b (tělísko se ztaví v polokulový tvar) a tečení t_c (zkušební tělísko se roztéká). Jednotlivé názvy v podstatě vystihují počátky změn probíhajících v popelu. Z pohledu provozovatelů spalovacích zařízení jsou nejdůležitější teploty sintrace a měknutí popela.

Proces sintrace probíhá v pevné fázi popela, což vede ke spékání zrněk a chemickým změnám. Tento proces je ovlivněn chemickým složením, deformacemi a velikostí povrchu zrněk. Proces měknutí charakterizuje stav, kdy některá složka popela přechází do taveniny.

Popel tedy přechází ve směs taveniny a pevné fáze a se vzrůstající teplotou dochází k nárůstu podílu taveniny. Tvarová deformace tělíska je pak definována teplotou tání a tečení [13].

3.6 Stanovení obsahu prvků

Pokud biopaliva obsahují těžké kovy (arsén, kadmium, chrom, měď, rtuť, nikl, olovo, vanad, zinek aj.), mohou být tyto prvky obsaženy i v popílku a popelu, což má negativní důsledky na životní prostředí. Proto se provádí analýza přítomnosti a množství těžkých kovů. Metodou, kterou se tyto prvky stanovují, lze stanovit také obsahy dalších prvků-hliníku, vápníku, železa, draslíku, hořčíku, manganu, sodíku, fosforu, křemíku, titanu a dalších.

Stanovení obsahu hlavních prvků v biopalivech se provádí podle ČSN P CEN/TS 15290 optickou emisní spektrometrií s indukčně vázanou plazmou (ICP/OES), hmotovou spektrometrií s indukčně vázanou plazmou (ICP/MS) nebo plamenovou atomovou absorpční spektrometrií (AAS). Touto metodou se stanoví i stopové množství prvků (tj. obsah v ppm).

Zdrojem kontaminace biopaliv výše uvedenými prvky jsou zejména:

- A) konzervační chemikálie (kontaminace As, B, Cl, Cr, Cu, F, P, Zn)
- B) barvy (kontaminace Cd, Pb, Ti)
- C) použité minerální oleje a plastická maziva
- D) zemina (např. při skladování, transportu nebo manipulaci)
- E) doprava (kontaminace solí k úpravě silnic)
- F) použité nástroje či stroje (kontaminace Fe, Cr, Ni)
- G) přidaná aditiva (např. vápenec – kontaminace Ca, kaolin – kontaminace Si, Al)
- H) chemické přísady (louhy, lepidla, pojiva)

Nejčastěji se stanovují těžké kovy a prvky převážně související s možným znečištěním biomasy v průběhu transportu a zpracovávání. Stanovení hustoty a rozměrů.

Stanovení hustoty se provádí u pelet i briket z biomasy. Tato zkouška charakterizuje kvalitu pelet a briket z hlediska procesu výroby, zda byl při výrobě použit správný tlak a teplota.

Zkouška se provádí dvojím způsobem: Podle DIN 52 182 se změří rozměry pelety nebo brikety a na základě její hmotnosti a vypočítaného objemu se vypočítá její hustota. Podle ČSN P CEN/TS 15150 se peleta nebo briketa připevní na zkušební trojnožku a ponoří se do nádoby s vodou a na základě Archimedova zákona (vztlaku kapaliny) se vypočítá hustota pelety. Hodnoty se uvádějí v kg/dm^3 , resp. v g/cm^3 . Normy pro klasifikaci pelet a briket uvádějí i jejich požadované rozměry. Tyto rozměry jsou v laboratořích rovněž přezkušovány a měření se provádí běžnými ověřenými délkovými měřidly [12].

3.7 Chlór a síra v palivu

Je všeobecně známo, že rostliny chlor obsahují, záleží ale na množství, hlavně v závislosti na jednotlivých druzích rostlin. Biomasa rostlinného původu – nedřevní, obsahuje chlor, který by mohl způsobovat poškození vnitřních prostor kotle při jejím spalování.

Obsah chloru v rostlinách a jeho změny v chemizmu v průběhu hoření jsou jistě důležité poznatky, ale konkrétní vyjádření jejich vlivů na odolnost vnitřních prostor kotle je velmi nesnadné. V současné době lze spolehlivě hodnotit obsah chloru i dalších prvků, zatím hlavně v rostlinném materiálu.

Tabulka 3 Přehled obsahů síry a chloru v biomase[15]

	Cl, chlor	rozsah	S, Síra	rozsah
	%		%	
Dřevo, zbytky po těžbě	0,01	0,01 – 0,04	0,04	0,01 – 0,08
Topol – rychle rostoucí podrost	0,01	0,01 – 0,05	0,03	0,02 – 0,10
Sláma – pšenice, žito, ječmen	0,4	0,1 – 1,2	0,1	0,05 – 0,2
Sláma - řepka olejka	0,5	0,1 – 1,2	0,3	0,05 – 0,8
Chrastice rákosovitá	0,6		0,2	
Seno obecně	0,8		0,2	
Miscanthus – slonní tráva	0,2		0,2	
Krmný šťovík	0,17		0,09	

Oproti hodnotě obsahu chloru v dřevěných peletách, která je jen 0,01 %hm (rozsah od 0,01 do 0,04 %) je obsah chloru ve všech analyzovaných bylinných peletách vyšší, což plně odpovídá i typickým hodnotám obsahu chloru uváděné v ČSN P CEN/TS 14961. Z toho jednoznačně vyplývá, že nelze fytomasu z rostlin (nedřevní) posuzovat podle obsahu chloru ve fytomase dřevní. Z výsledků analýz pelet lze ale také doložit, že sláma je fytomasa, která by měla zatěžovat prostory kotle nejvíce. Naopak pelety ze šťovíku jeví nejnižší obsahy jak chlóru, tak síry [15].

4 Vybrané druhy agropelet

V dnešní době se na trhu objevuje několik druhů alternativních pelet a to především ze sena, slámy z obilnin a slámy z olejnin. Tyto pelety vystupují na trhu například pod značkou Ekover, nejedná se však o jedinou značku těchto pelet. Další vhodnou stébelninou pro výrobu pelet se jeví šťovík a kukuřice. Uvedené vlastnosti tuhých paliv budou popsány pro tyto druhy agropelet. Z hlediska výhodnosti těchto paliv bude provedeno porovnání s rozšířenějším palivem a tím jsou dřevěné pelety [16].

4.1 O palivu EKOVER

Rostlinné materiály jsou tvořeny převážně odpadem z čištění semen zemědělských plodin. Obsahují hlavně: zlomky semen, povrchové vrstvy semen, nestandardní semena, plevy, pluchy, osiny, kousky ostatních částí rostlin, semena plevelů a nekulturních rostlin, biologický odrol.

Jako doplňkovou surovinu lze použít i otruby, sladové plevy, sladový prach, mouky nevhodné k potravinářským nebo krmným účelům, semena rostlin nevhodná k potravinářským nebo krmným účelům.

Typy:

- A) Ekover S-Rostlinné materiály jsou tvořeny senem, slámou obilnin a slámou olejnin.
- B) Ekover T-Rostlinné materiály jsou tvořeny celými nadzemními částmi žitovce (Triticale, kříženec žita a pšenice) slámou a klasy včetně zrna.
- C) Ekover O-Rostlinné materiály jsou tvořeny celými nadzemními částmi obilovin a olejnin pěstovaných pro nepotravinářské využití, slámou a klasy včetně zrna či semenem.
- D) Ekover F-Jde o palivo tvořené fermentačními zbytky z bioplynových stanic.
- E) Ekover P-Palivo je tvořeno 100 % odpadním papírem.
- F) Ekover SP-Palivo je tvořeno z 70 % slámou obilovin a olejnin a z 30 % papírem.
- G) Ekover OP-Palivo je tvořeno z 70 % obilovinami a olejninami (celé rostliny sláma a zrno) a z 30 % papírem [16].

Dále budou popsány jednotlivé plodiny, z nichž se vyrábějí čisté agropelety.

U těchto zemědělských materiálů se jejich chemické složení a celkové vlastnosti mohou velice lišit. Záleží proto na původu produktu a podmínkách růstu doby sklizně atd. V zájmu každého zemědělského družstva je, aby jeho plodiny vyrostly co nejdříve a proto používá hnojiva, která na druhou stranu ovlivňují spalovací proces. V palivu je zastoupen větší podíl alkalických kovů, které mají vliv na množství popela a jeho teploty tavení. Je proto důležité si uvědomit, že následující hodnoty jsou pro určitý druh např. slámy a sláma z „jiného“ pole může jevit odlišné vlastnosti.

4.2 Pšenice ozimá

Pšenice na území České republiky má ze všech ozimých obilovin největší osevní plochu, jak je patrné z Tabulka 5. Zároveň představuje i největší výnos a s kombinací poměru hmotnosti zrna a slámy vyčtené v Tabulka 4 se stává největším množstevním potenciálem pro výrobu alternativních pelet.

Tabulka 4 Bilanční hodnoty obilovin a řepky v ČR [17]

Plodina	Výnos (t/ha)	Poměr hmotnosti zrna a slámy
Pšenice	4,88	1 : 1,85
Ječmen	3,85	1 : 1,08
Žito	4,72	1 : 1,70
Tritikale	4,29	1 : 1,75
Řepka	3,1	1 : 1,20 až 1,80

Tabulka 5 Osevní plochy ozimých plodin [18]

Plodina	Osevní plocha pro sklizeň (ha)	
	2015	2016
Obiloviny ozimé celkem	947 611	978 469
Pšenice ozimá	778 200	795 936
Žito ozimé	21 980	30 448
Ječmen ozimý	104 540	113 836
Tritikale	42 891	38 249
Řepka ozimá	366 180	381 450



Obrázek 2 Pelety z pšeničné slámy s aditivem hnědého uhlí [17]

Z hlediska energetického byly vlastnosti pšenice shrnuty do následující tabulky.

Tabulka 6 Přehled vlastností pelet vyrobených ze pšenice ozimé [19, s. 55]

Pšenice ozimá	Hrubý rozbor [%hmot]				Prvkový rozbor [%hmot]		
	r ¹	d ²	daf ³		r	d	daf
voda	9,36	-	-	Uhlík (C)	41,7	46	48,5
popel	4,59	5,06	-	Vodík (H)	5,41	5,97	6,29
hořlavina	86,1	94,9	100	Kyslík (O)	38,3	42,3	44,5
prchavá	69,2	76,3	80,4	Dusík (N)	0,53	0,59	0,62
neprchavá	16,9	18,6	19,6	Chlór (Cl)	0,07	0,08	0,08
Spalné teplo⁴	16,8	18,5	19,5	Fluór (F)	ND ⁵	ND	ND
Výhřevnost	15,3	17,2	18,1	Brom (Br)	ND	ND	ND
Teploty popela [°C]				Obsah síry (S) [%hmot]			
deformace (t_s)	979			prchavá	0,02	0,03	0,03
měknutí (t_a)	987			v popelu	0,05	0,05	-
tání (t_h)	1128			veškerá	0,07	0,08	-
tečení (t_c)	1138						

Pelety z pšeničné slámy jeví dobrou výhřevnost 15,3 MJ.kg⁻¹, obsah vody do 10 % a popeloviny do 5 %. Důležitým faktorem je obsah chlóru a síry, který v obou případech činí 0,07 % hmotnosti. Velkou nevýhodou tohoto paliva se ukazují nižší teploty deformace a měknutí popela, které nepříznivě působí na stěny kotle ve spalovací komoře. Jako jisté opatření pro zvýšení teploty deformace a měknutí popela může být přidání aditiva např. hnědého uhlí, nebo slupek kakaových bobů. Na zvýšení teploty mají největší vliv uhelné jílly, tzv. černouhelné kaly [17].

¹ r- palivo v dodaném stavu

² d- palivo v bezvodém stavu

³ daf- hořlavina vzorku

⁴ Spalné teplo a výhřevnost udávaná v MJ.kg⁻¹

⁵ ND- nedefinováno

4.3 Řepka

Hned za výnosy pšenice se nachází řepka. Energetické hodnoty jsou shrnuty v následující tabulce.

Tabulka 7 Přehled vlastností pelet vyrobených z řepky olejné [19, s. 59]

řepka	Hrubý rozbor [%hmot]				Prvkový rozbor [%hmot]		
	r	d	daf		r	d	daf
voda	9,45	-	-	Uhlík (C)	40,9	45,2	48,1
popel	5,5	6,07	-	Vodík (H)	5,26	5,81	6,19
hořlavina	85,1	93,9	100	Kyslík (O)	37,9	41,9	44,6
prchavá	68	75,1	79,9	Dusík (N)	0,57	0,63	0,67
neprchavá	17,1	18,9	20,1	Chlór (Cl)	0,27	0,3	0,32
Spalné teplo	16,3	18	19,2	Fluór (F)	ND	ND	ND
Výhřevnost	14,9	16,7	17,8	Brom (Br)	ND	ND	ND
	Teploty popela [°C]				Obsah síry (S) [%hmot]		
deformace (t_s)	1054			prchavá	0,07	0,08	0,09
měknutí (t_a)	1062			v popelu	0,27	0,3	-
tání (t_h)	1273			veškerá	0,34	0,38	-
tečení (t_c)	1279						

Porovnání s pšeničnou slámou vykazuje řepková sláma o 1 % vyšší popelnatost, obsah vody v palivu v dodaném stavu je přibližně stejný, stejně tak jako výhřevnost. Obsah chlóru je více jak 3krát větší a obsah síry je 5krát vyšší. Jako velice příznivé se jeví teploty popela, které jsou velmi obdobné jako u pelet ze dřeva, tudíž lze toto palivo provozovat i v kotlích na dřevěné pelety [17].

4.4 Šťovík

Nejdéle je u nás pěstován šťovík s označením Rumex OK 2, jeho velkou výhodou je, že se sklízí suchý a po sklizni se nemusí složitě dosušet [20]. Energetické hodnoty jsou shrnuty v následující tabulce na další stránce.



Obrázek 3 Topné pelety ze šťovíku [7]

Tabulka 8 Přehled vlastností pelet vyrobených ze šťovíku [19, s. 75]

šťovík	Hrubý rozbor [%hmot]				Prvkový rozbor [%hmot]		
	r	d	daf		r	d	daf
voda	9,96	-	-	Uhlík (C)	42,3	47	49,2
popel	4,1	4,55	-	Vodík (H)	5,2	5,77	6,05
hořlavina	85,9	95,5	100	Kyslík (O)	37,2	41,3	43,3
prchavá	66,1	73,4	76,9	Dusík (N)	1,04	1,15	1,2
neprchavá	19,8	22	23,1	Chlór (Cl)	0,15	0,02	0,18
Spalné teplo	16,9	18,7	19,6	Fluór (F)	ND	ND	ND
Výhřevnost	15,5	17,5	18,3	Brom (Br)	ND	ND	ND
Teploty popela [°C]				Obsah síry (S) [%hmot]			
deformace (t _s)	1086			prchavá	0,05	0,06	0,06
měknutí (t _a)	1093			v popelu	0,04	0,04	-
tání (t _h)	>1500			veškerá	0,09	0,1	-
tečení (t _c)	>1500						

Pelety vyrobené ze šťovíku mají obsah vody pod 10 % a popelnatost okolo 4 %. Výhřevnost se pohybuje na 15,5 MJ.kg⁻¹ a porovnání s řepkou má šťovík o polovinu menší obsah chlóru a obsah síry se pohybuje do 0,1 hmot. %. Šťovík není stébelnina a liší se od nich výrazně, neboť se jeho popel začíná tavit až při daleko vyšších teplotách, než je tomu u slámy [20].

4.5 Kukuřice

Kukuřice je v našich podmínkách velmi běžný produkt, je snadno dostupná. Pro spalování lze použít méně kvalitní nebo zničenou kukuřici, kterou nelze využít pro potravinářské nebo krmné účely [21]. Energetické hodnoty kukuřice jsou shrnuty v následující tabulce.

Tabulka 9 Přehled vlastností pelet vyrobených z kukuřice [19, s. 47]

kukuřice	Hrubý rozbor [%hmot]				Prvkový rozbor [%hmot]		
	r	d	daf		r	d	daf
voda	8,94	-	-	Uhlík (C)	36,6	40,2	47,4
popel	13,8	15,1	-	Vodík (H)	5,03	5,52	6,5
hořlavina	77,3	84,9	100	Kyslík (O)	34,5	37,9	44,6
prchavá	61,4	67,5	79,5	Dusík (N)	0,92	1,01	1,19
neprchavá	15,9	17,4	20,5	Chlór (Cl)	0,24	0,26	0,31
Spalné teplo	15	16,5	19,4	Fluór (F)	ND	ND	ND
Výhřevnost	13,7	15,3	18	Brom (Br)	ND	ND	ND
Teploty popela [°C]				Obsah síry (S) [%hmot]			
deformace (t _s)	1044			prchavá	0,01	0,02	0,02
měknutí (t _a)	1052			v popelu	0,05	0,05	-
tání (t _h)	1257			veškerá	0,06	0,07	-
tečení (t _c)	1264						

Kukuřice se jeví jako velmi levný zdroj pro spalování v domovních kotlech o výhřevnosti okolo 14 MJ.kg^{-1} . Vypovídá méně vody než pšenice, řepka i šťovík a to pod 9 %, avšak popelnatost dosahuje hranice až 14 % hmotnosti. Spékavost popela je téměř srovnatelná s řepkovými peletami. Obsah chlóru činí 0,24 hmot. % a dále v kukuřici je minimální množství síry 0,06 hmot. %. Velké množství popela lze použít například k dalšímu hnojení plodin [11].

4.6 Seno

Mezi energetické rostliny se řadí i travní porosty, do kterých patří psineček veliký. Jedná se o luční seno, které se hodí jak pro spalování v kotlích malých výkonů $>50 \text{ kW}$ tak kotlech velkých výkonů [22]. Energetické hodnoty psinečku velikého jsou shrnuty v následující tabulce.

Tabulka 10 Přehled vlastností pelet vyrobených z psinečku [22][17]

psineček	Hrubý rozbor [%hmot]				Prvkový rozbor [%hmot]		
	r	d	daf		r	d	daf
voda	9,91	-	-	Uhlík (C)	39,64	43,73	45,56
popel	4,9	5,3	-	Vodík (H)	6,08	6,54	6,67
hořlavina	89,2	96,9	100	Kyslík (O)	42,18	46,48	47,36
prchavá	-	-	-	Dusík (N)	0,36	0,38	0,39
neprchavá	-	-	-	Chlór (Cl)	0,23	-	-
Spalné teplo	18,04	19,43	18,65	Fluór (F)	ND	ND	ND
Výhřevnost	15,88	18,19	18,645	Brom (Br)	ND	ND	ND
Teploty popela [°C]				Obsah síry (S) [%hmot]			
deformace (t_s)	850			prchavá	-	-	-
měknutí (t_a)	990			v popelu	-	-	-
tání (t_h)	1000			veškerá	<0,001	<0,001	<0,001
tečení (t_c)	1190						

Pelety ze sena mají hranici vlhkosti pod 10 % a hranici popela pod 5 % hmotnosti. Jedná se o velice výhřevné pelety s hodnotou až 16 MJ.kg^{-1} . Další velkou výhodou je, že neobsahují žádnou síru, ale obsahují větší obsah chloru až 0,23 %, tomuto lze zabránit prodloužením vegetační doby z hlediska sklizně způsobující snížení koncentrace prvků (N, S, K, Na a Cl), které jsou nežádoucí pro spalovací procesy [23].

Při spalování sena trav je velkou nevýhodou nízká teplota tavení popela, která může být zapříčiněna vysokým obsahem SiO_2 . Podle teoretických poznatků jsou pro chování popela rozhodující poměry obsahu oxidů hliníku, křemíku, sodíku, draslíku, manganu a vápníku. Hlavní prvky působící, dá se říci proti sobě, jsou vápník a křemík. Jako zajímavým aditivem se jeví papír ze skartačních center, který vypovídá vysoký podíl CaO a nižší podíl SiO_2 a K_2O . Použití skartačního papíru se projevuje zvýšením teploty tavení popela a zároveň i určitým zhoršením emisních parametrů oproti dřevu. Jako optimální dávka se tak jeví cca 20 až 30 %

přídavek papíru k lučnímu senu [22].

4.7 Bílé dřevo

Dřevní pelety mohou dosahovat různé barvy v závislosti na použitém druhu dřeva, na kvalitě suroviny ovlivněné vlhkostí nebo příměsí kůry apod. a použitým technologickým procesem výroby. Jedná-li se o čisté bílé dřevo, bez příměsí kůry pelety mají světlou barvu [7].

Dřevní pelety jsou velice rozšířené v Evropě, která tvoří až 50 % celkové světové produkce certifikovaných pelet ENplus [21]. Velká výhoda dřevních pelet je v nízké popelnatosti paliva do 0,7 %. V této práci jsou dřevní pelety uvedeny zejména kvůli porovnání s alternativními palivy, kde jejich energetické specifikace jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 11 Přehled vlastností pelet vyrobených z buku [19, s. 43]

Bílé dřevo – Buk	Hrubý rozbor [%hmot]				Prvkový rozbor [%hmot]		
	r	d	daf		r	d	daf
Voda	13,6	-	-	Uhlík (C)	42	48,6	48,8
popel	0,44	0,51	-	Vodík (H)	5,41	6,26	6,29
hořlavina	86	99,5	100	Kyslík (O)	38,5	44,5	44,8
prchavá	72	83,3	83,8	Dusík (N)	0,11	0,13	0,13
neprchavá	13,9	16,2	16,8	Chlór (Cl)	<0,01	<0,01	<0,01
Spalné teplo	16,5	19,1	19,2	Fluór (F)	ND	ND	ND
Výhřevnost	15	17,7	17,8	Brom (Br)	ND	ND	ND
Teploty popela [°C]				Obsah síry (S) [%hmot]			
deformace (t _s)	1170			prchavá	0	0	0
měknutí (t _a)	1190			v popelu	0,01	0,01	-
tání (t _n)	1280			veškerá	0,01	0,01	-
tečení (t _c)	1370						

Používání dřevních pelet je výhodné z hlediska nízké popelnatosti a nízkého zastoupení prvků chlóru a síry. Teploty tavení popela jsou postaveny o mnoho výše než zbytek uvedených alternativních paliv.

4.8 Porovnání hlavních vlastností

Každá surovina se pro výrobu a následné spalování může hodit z různého hlediska a požadavků. V následující tabulce bude uvedeno konečné srovnání zásadních vlastností agropelet a dřevních pelet.

Tabulka 12 Porovnání vlastností agropelet

	Pšenice	Řepka	Šťovík	Kukuřice	Seno	Dřevo
Voda	9,36	9,45	9,96	8,94	9,91	13,6
Popel	4,59	5,5	4,1	13,8	4,9	0,44
Spalné teplo	16,8	16,3	16,9	15	18,04	16,5
Výhřevnost	15,3	14,9	15,5	13,7	15,88	15
Chlór (Cl)	0,07	0,27	0,15	0,24	0,23	<0,01
Síra (S)	0,07	0,34	0,09	0,06	<0,001	0,01

5 Kotle na tuhá paliva, emise, imise a jejich limity

Spalování nekvalitních, příp. zakázaných druhů paliv v technicky nevyhovujících spalovacích zdrojích, se negativně odráží na kvalitě ovzduší v celé ČR. Problematické jsou v této souvislosti především nadlimitní úrovně znečištění prachovými částicemi (TZL), polycyklickými aromatickými uhlovodíky, příp. těžkými kovy [24].

Znečišťující látky v koncentrované podobě, tak jak vystupují ze zdroje znečišťování, u kotelní z komína, označujeme jako emise a jejich maximální povolená koncentrace je omezena podle zákona o ovzduší a navazujícími předpisy tzv. emisními limity.

Znečišťující látky rozptýlené v ovzduší se v tzv. přízemní vrstvě, tj. tam, kde jsou obsahem ovzduší, které dýcháme, označují jako imise a nejvyšší dovolené koncentrace těchto látek jsou opět omezeny zákonnou normou ve formě imisních limitů [21].

5.1 Hlavní znečišťující látky při spalování

Znečišťující látky, které vycházejí z komína, v podobě spalin závisejí na několika faktorech např. složení paliva, spalovací podmínky, teplotě spalování a množství přebytku vzduchu. Představitelé hlavních znečišťujících látek jsou především oxidy síry (SO_2 , SO_3 , H_2S , COS), oxidy uhlíku (CO , CO_2), oxidy dusíku (souhrnně označované NO_x).

Při spalování biomasy jsou do ovzduší emitovány další nebezpečné látky, které v přírodě nesnadno podléhají rozkladu, nebo přeměně. Jsou to tzv. perzistentní organické polutanty (POP), hlavními zástupci POP jsou chlorované organické látky organochlorové pesticidy, polychlorované bifenylly (PCB) a polychlorované dibenzodioxiny a dibenzofurany (PCDD/F), z nichž poslední jsou nejškodlivější a karcinogenní.

Z nechlorovaných škodlivin se mezi POP řadí těkavé organické sloučeniny (VOC), hlavní zástupci např. benzen, toluen, xyleny a také polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH) např. naftalen, fenanthren, pyren, benzopyren, který je nejškodlivější a všechny tyto škodliviny mohou být karcinogenní.

Při spalování tuhých paliv vznikají také prachové částice tzv. (TZL). Účinek na organismus je závislý na složení, tvaru a velikosti. Částice větší než $100\text{ }\mu\text{m}$ se většinou do dýchacích cest nedostanou. Prachové částice mohou mít na lidský organismus dráždivé, toxické, fibrogenní a alergizující účinky. Vezme-li se v potaz, že volný chlór reaguje s částicemi uhlíku přítomnými na popílku unášeném ve spalinách, stávají se TZL nositeli dalších nebezpečných emisí, jejich omezování je zde velmi důležité a dále bude největší důraz kladen na určování těchto tuhých znečišťujících látek [25].

5.2 TZL

Tuhé znečišťující látky TZL, někdy označené jako (PM), v anglické literatuře mohou být označovány jako TSP – total suspended particles. Jsou dominantně tvořeny jemnými částicemi frakce PM₁ (částice $\leq 1 \mu\text{m}$) tvoří celkový prach při spalování biomasy v lokálních topeništích více než z hm. 90 %. Prach ve spalinách pochází ze dvou hlavních zdrojů:

- A) Z popeloviny – anorganické nespalitelné části paliva. Větší část popele zůstane v popelníku, na roštu a ve výměníku spalovacího zařízení.
- B) Z produktů nedokonalého spalování – saze a zkondenzované organické látky (uhlovodíky, dehty) [26].

Při nedokonalém spalování, provozování spalování v zařízení zastaralého typu vzniká daleko více prachu, nežli v moderním zařízení, kde převažují emise prachu pouze z popeloviny.

Emise tuhých znečišťujících látek představují velký problém, cca 1/3 emisí tuhých znečišťujících látek, které se dostanou do ovzduší, pochází z lokálních zdrojů na pevná paliva [27, s. 94].

5.2.1 Měření z laboratoře Poznan University of Technology

Pro měření byl použit kotel s výkonem 15 kW, na kterém bylo použito palivo ze sena, dřeva, jejich kombinace a palivo ze slunečnice. V následující tabulce jsou uvedeny potřebné hodnoty [28].

Tabulka 13 Měření z laboratoře Poznan University of Technology

Typ paliva	Dřevo	Seno + dřevo	Seno	Slunečnice
Poměr [%]	100/0	50/50	100/0	100
TZL [mg/m ³]	8	32	45	25

Hodnoty jsou spočteny pro referenční obsah kyslíku $O_2=10\%$.

5.2.2 Měření na německém kotli Heizomat RHK-AK 50

Pro měření byl použit kotel s výkonem 30 kW, na kterém bylo použito palivo dřevo, ječmen, pelety z pšeničné slámy a pelety z žitné slámy. V následující tabulce jsou uvedeny potřebné hodnoty [29].

Tabulka 14 Kotel Heizomat RHK-AK 50

Typ paliva	Dřevo	Ječmen	Pšeničná sláma	Žito
TZL [mg/m ³]	17	101	129	267

Hodnoty jsou spočteny pro referenční obsah kyslíku $O_2=13\%$.

5.2.3 Měření v dánském technologickém institutu

Pro měření byli použity dva kotle první Twin Heat s výkonem 20 kW a druhý Reka 30 kW. Testovali se paliva ze dřeva, pšenice s přidavkem 1 % vápenné moučky a obilné zrna s přidavkem 5 % vápenné moučky.

V následující tabulce jsou uvedeny potřebné hodnoty [30].

Tabulka 15 Měření dánského technologického institutu

Typ paliva/typ kotle	Dřevo/Twin Heat	Pšenice/Twin Heat	Obilné zrna/Reka 30
TZL [mg/m ³]	35	337	338

Hodnoty jsou spočteny pro referenční obsah kyslíku $O_2=10\%$.

5.2.4 Měření v Praze na kotli VERNER A25

Na kotli o výkonu 25 kW se testovali 4 paliva. Primárně pelety z pšenice a ovesa a alternativní pelety (směs zemědělských rostlinných zbytků) a pro referenční hodnoty se použilo palivo z bílého dřeva. Hodnoty TZL jsou uvedeny v následující tabulce [31].

Tabulka 16 Měření v Praze na kotli VERNER A25

Typ paliva	Alternativní pelety	Oves	Pšenice	Bílé dřevo
TZL [mg/m ³]	166	112	281	175

Hodnoty jsou spočteny pro referenční obsah kyslíku $O_2=11\%$.

5.2.5 Diskuze

Prohlédnutím podkapitol 5.2 se dá snadno vyčíst, že při měření emisí TZL dřevo oproti alternativním palivům jeví až 10krát menší množství prachu na jeden metr krychlový spalin. Emise prachu ukazují jistou závislost na složení paliva. Tento jev vysvětlit v důsledku různých obsahů prvků tvořících aerosol v palivu (K, Cl, Na, S, Ph, Zn) [29].

Chemické složení poletavého popílku ukázalo, že Al_2O_3 , SiO_3 a Fe_2O_3 přispívají 50-70 % z celkového obsahu popílku. Kromě těchto složek je CaO dalším hlavním prvkem popílku. Co se týče biomasy / agropaliv, silikáty přispívají zhruba 30 % k celkové hmotnosti popela [32].

Dalším důležitým faktorem, proč emise TZL u slámy a trav jeví vyšší hodnoty než dřevo, je peletování samotné. Z tohoto hlediska je důležité zmínit především to, že sláma se musí prvně rozsekat na určitou frakci a následně putuje do peletovacího lisu. Už při tomto procesu vzniká velké množství prachu. Před zavedením slámy do lisu je dobré ji napřed odprášit (metoda firmy Lehmann Maschinenbau, Jocketa). Hlavním cílem tedy je zvýšit pevnost pelet a snížit emise prachu. Toto se dá docílit různými přísadami např. melasy. Melasa se přidává z důvodu menšího množství ligninu. Pro zvýšení teplot tavení popele se do slámy přidává vápno bohaté na magnézium, to má však za následek jednak větší opotřebení matrice lisu, a hlavně vysoké hodnoty otěru a jemných částic. Přidáním škrobu (3 %) pevnost pelet rovněž snižuje [33].

Na základě informací od provozovatelů kotlů, lze usoudit, že zvýšené emise prachu při spalování alternativních pelet jsou dány několika faktory. Počínaje přípravou na peletování a peletování samotné, dále je to nižší pevnost pelet (tato peleta se při vstupu do spalovací komory rozpadne a uvolní ze sebe prachové částice). Větší obsah popeloviny v palivu má také za následek zvyšující se koncentrace prachu ve spalinách.

5.3 Produkce emisí v ČR

Pro potřeby bilance emisí z lokálního vytápění domácností je od roku 1997 používána metodika založená na údajích ze Sčítání lidu, domů a bytů (SLDB). Údaje ze SLDB jsou každoročně aktualizovány ve spolupráci s regionálními dodavateli paliv a energií.

V současné době se postupuje podle upravené metodiky z roku 2006 (Machálek, Machart 2007) se zahrnutím výsledků SLDB 2011. Konečným výstupem modelu jsou údaje o emisích znečišťujících látek a palivové skladbě domácích topenišť na úrovni jednotlivých obcí, které jsou obsaženy v databázi REZZO⁶ 3. Vedle lokálního vytápění domácností jsou v databázi REZZO 3 dopočítávány údaje o emisích z dalších stacionárních zdrojů [34].

⁶ REZZO- Registr emisí a zdrojů znečišťování ovzduší

*Tabulka 17 REZZO 3–2014 Emise hlavních znečišťujících látek
v České republice podle krajů [34]*

Kraj	TZL		SO ₂		NO _x		CO		VOC		NH ₃	
	[t/rok]	%	[t/rok]	%	[t/rok]	%	[t/rok]	%	[t/rok]	%	[t/rok]	%
Hlavní město Praha	236,5	0,9	105,3	0,8	289,7	4,3	1 743,80	0,8	3 131,00	3,4	80,3	0,1
Středočeský kraj	4 720,20	17,4	3 171,10	23,5	1 153,50	17,1	42 742,20	18,4	14 385,30	15,4	10 308,10	15,4
Jihočeský kraj	2 390,10	8,8	1 486,10	11	562,2	8,4	26 160,10	11,3	6 732,20	7,2	7 957,20	11,9
Plzeňský kraj	1 996,70	7,4	1 214,00	8,9	466,4	6,9	18 704,20	8,1	5 222,50	5,6	6 474,10	9,7
Karlovarský kraj	1 110,80	4,1	413,8	3	156,1	2,2	5 875,10	2,5	2 895,30	3	1 546,40	2,3
Ústecký kraj	4 277,80	15,7	1 184,50	8,7	415,3	6,2	14 438,60	6,2	7 992,40	8,6	2 849,30	4,3
Liberecký kraj	961,1	3,5	983,6	7,2	316,2	4,7	12 628,70	5,5	3 659,90	3,9	1 690,70	2,5
Královéhradecký kraj	1 764,30	6,5	1 054,40	7,8	429,8	6,4	16 646,30	7,2	5 949,10	6,4	4 945,60	7,4
Pardubický kraj	1 603,00	5,9	790,2	5,8	408,4	6,1	14 714,00	6,4	4 931,70	5,3	5 560,50	8,3
Vysočina	2 066,80	7,6	1 047,10	7,7	500,6	7,4	19 726,60	8,5	5 359,30	5,8	8 389,80	12,6
Jihomoravský kraj	1 579,40	5,8	313,6	2,3	598,2	8,9	11 891,50	5,1	7 421,90	8	5 800,90	8,7
Olomoucký kraj	1 157,40	4,3	449,1	3,3	407,4	6,1	13 943,60	6	5 640,30	6,1	4 391,50	6,6
Zlínský kraj	926,6	3,4	285,5	2,1	388,3	5,8	12 983,50	5,6	6 628,40	7,1	3 278,40	4,9
Moravskoslezský kraj	2 374,10	8,7	1 072,20	7,9	640	9,5	19 502,10	8,4	13 245,40	14,2	3 527,10	5,3
CELKEM	27 164,70	100	13 570,50	100	6 732,10	100	231 700,40	100	93 194,70	100	66 799,90	100

Z Tabulka 17 vyplývá, že celková produkce TZL z lokálních topenišť za rok 2014 tvoří téměř 27 165 tun prachu, který může být nositelem dalších nebezpečných emisí, přičemž nejvíce přispívá Středočeský kraj.

5.4 Legislativa emisních tříd kotlů

Emisní třída dle ČSN EN 303-5 je kotli přiřazena na základě výsledků spalovacích a dalších zkoušek před uvedením na trh a udává jeho technologickou vyspělost. Nejvyšší stupeň je 5., nejnižší 1. Vedle tvorby škodlivých emisí se posuzuje i účinnost, bezpečnost a efektivita. Čím vyšší číslo emisní třídy, tím lepší výsledky a lepší kotel [3].

Emisní třída tedy vypovídá o tom, do jakého limitu emisí a do jaké maximální účinnosti se kotel vešel za ideálních podmínek ve zkušebně. Jeho reálné emise však může při provozu ovlivňovat instalace, údržba nebo kvalita paliva [6].

Tabulka 18 Přehled povinností souvisejících s prodejem a provozem kotlů na tuhá paliva pro vytápění domácností (do 500 kW) [21]

Platnost od	Popis nařízení
1. 1. 2014	Zákaz prodeje kotlů 1. a 2. emisní třídy (možnost legálně zakoupit a uvést do provozu pouze kotle 3., 4. a 5. emisní třídy)
1. 1. 2017	Povinnost na vyžádání předložit revizi kotle (včetně označení emisní třídy)
1. 1. 2018	Zákaz prodeje kotlů 3. emisní třídy (možnost legálně zakoupit a uvést do provozu pouze kotle 4. a 5. emisní třídy)
1. 1. 2020	Zákaz prodeje kotlů 4. a 5. emisní třídy (možnost legálně zakoupit a uvést do provozu pouze kotle splňující požadavky EKODESIGN)
1. 9. 2022	Zákaz používání kotlů 1. a 2. emisní třídy (bez ohledu na to, kdy byly pořízeny)
pozn.: Emisní třídy dle EN 303-5 zjednodušeně je možné říci, že požadavky dle EKODESIGN jsou rozšířené požadavky na 5. emisní třídu	

V dnešní době již není možné zakoupit kotle emisní třídy 1 až 3. Přitom v roce 2022 nastane naprostý zákaz používání kotlů na tuhá paliva emisní třídy 1,2. Další velmi důležité datum nastane 1.1. 2020, kdy na trh nastoupí pouze tzv. kotle s požadavky EKODESIGN.

Z těchto informací je nyní důležité zjistit, zda se vyplatí používání alternativních pelet pro automatické kotle, aby byly splněny požadavky na emisní limity, které budou uvedeny v další tabulce.

Tabulka 19 Emisní limity kotle 3,4,5 třídy [26]

Dávka paliva	Palivo	Jmenovitý výkon [kW]	Mezní hodnoty emisí		
			TZL [mg/m ³]		
			třída 3	třída 4	třída 5
Samočinná	biogenní	0-50	150	60	40
		50-150			
		150-500			

Limitní strop pro používání kotlů emisní třídy 3 zatím nebyl ustanoven. Kotel se může dále provozovat, jestliže TZL emise nepřesáhnou 150 mg/m³. Výrobci se ale musejí zaměřit na výrobu kotlů emisní třídy 4 pro niž je limit 60 mg/m³ a třídy 5, popřípadě požadavky EKODESIGN, které nesmějí přesáhnout limit 40 mg/m³ spalin.

Agropelety se zatím na trhu jeví jako velmi levný zdroj paliva pro kotle na tuhá paliva. Pokud by emise TZL však přesáhly tyto stanovené stropy, musely by se použít jistá opatření v podobě katalyzátorů a elektrostatických odlučovačů, což by zvedlo cenu kotle a z ekonomického hlediska by toto palivo ztratilo svůj význam, pro kotle malých výkonů. Experimentální část práce odhalí skutečnou tvorbu TZL a případně otevře diskuzi o jejich minimalizaci.

6 Experimentální část

6.1 Hrubý rozbor paliv

Před začátkem měření emisí na kotli je nejprve nutné zjistit složení pelet, které se dostaly k ověření. Jako první se začalo se zjišťováním vody v palivu, následně v muflové peci zjištění popeloviny v palivu a hrubý rozbor uzavírá zjištění spalného tepla v kalorimetru.

6.1.1 Vlhkost pelet

K měření vlhkosti jsou k dispozici dva přístroje. Jedním z nich jsou halogenové sušící váhy KERN. Přístroj KERN MLS používá metodu termo-gravimetrie, kdy je vzorek vložen na váhy a následovně vystaven tepelnému namáhání. Při této metodě se vzorek váží před zahřátím a po něm, aby se z rozdílu stanovila vlhkost materiálu [35].

Z důvodu časové náročnosti sušení na těchto vahách a množství zadaných pelet se zvolila metoda sušení v sušárně Venticell, kde je možné naskládat všechny druhy pelet najednou. Opět je nutné zvážit váhu paliva před vložením do sušárny a po procesu sušení. Váhy KERN se použili následně pro porovnání některých druhů agropelet. Pro jeden druh pelet se použily vždy dva vzorky a následně se udělal aritmetický průměr. Tyto dvě hodnoty se od sebe příliš nelišily. Výsledky jsou uvedeny v následující Tabulka 20.

Tabulka 20 Vlhkost určených pelet

Druh pelet	Vlhkost [%] (sušárna)	Vlhkost [%] (KERN)
Šťovík	9,03	8,98
Slunečnice	7,22	ND
Čistá sláma	6,55	ND
Svitoh	7,11	ND
Dřevo	4,98	ND
Sláma + kal	4,11	ND
Světlá vojtěška	8,40	ND
Tmavá	8,91	ND
Kakaové slupky	ND	7,46
Energokompost	18,07	19,25
Čistý digestát	ND	8,95
Smrk + digestát	ND	7,48

Z předchozí tabulky plyne, že největší vlhkost má energokompost, který dosahuje hranici téměř 20 % vody v palivu. Důvodem může být, že toto palivo nebylo dodáno jako peleta, ale v podobě štěpky, ze které se peleta následně vytvořila. Toto palivo by se mělo důkladněji vysušet, aby nedocházelo ke snižování výhřevnosti. Naopak zbylé vzorky jeví skvělou hodnotu pod 10 % objemu, nejlépe je na tom pak kombinace slámy s čistírenským kalem.

6.1.2 Popelnatost pelet

Při určování množství popela se zahřívá vzorek paliva na teplotu, u které dochází k odpaření vody, vyhořívání hořlaviny ve vzorku paliva specifikovanou rychlostí a udržování vzorku při této teplotě do dosažení konstantní hmotnosti. Obsah popela se určí z hmotnosti zbytku vzorku po spálení.

Spalování vzorku probíhá v elektrických muflových pecích s regulací teploty a možností plynulé výměny vzduchu. Spalovací kelímky musí být vyrobeny z vhodných materiálů, např. křemík, platina, porcelán [36].

Za prvé se zvažil vzorek paliva na digitální váze EXPLORE PRO EP. Poté byly jednotlivé vzorky umístěny do spalovací pece VEB ELEKTRO o výkonu 2.8 kW. Dle normy ISO 1171 byla vždy nastavena teplota spalování paliva 550 °C po dobu dvou hodin. Následovně byly vzorky z pece vyjmuty a došlo ke zvážení popela. Na základě jednoduché úvahy byla poté vypočteno množství popeloviny [35].

Z rozdílu hmotnosti byly následně vypočteny hodnoty procentuálního zastoupení popele v palivu a byly vloženy do následující tabulky.

Tabulka 21 Přehled popelnatosti pelet

Druh pelet	Popelnatost [%]
Šťovík	5,40
Slunečnice	4,18
Čistá sláma	6,14
Svitoh	18,68
Dřevo	16,58
Sláma + kal	36,84
Světlá vojtěška	7,52
Tmavá	16,40
Kakaové slupky	20,19
Energokompost	29,37

Vypočtené hodnoty jeví na první pohled jistou poruchovost. U vzorků, jejichž hodnota přesahuje 15 %, bylo po vyjmutí z pece zřetelně pozorovatelné, že nevyhořely zcela a stále se v nich nachází nespálený uhlík a další prvky. Naopak u prvních tří vzorků (šťovík, slunečnice a čistá sláma) vychází hodnoty totožné s praxí. Tyto tři vzorky se nechaly v peci o něco déle, přibližně 5 hodin.

U vzorků, kde přesáhla popelnatost 15 %, je nutné přezkoumat prvkový rozbor po vyžhání. Další žhání bylo provedeno na jiném pracovišti a za vyšších teplot. Hodnoty pro porovnání jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 22 Porovnání popelnatosti pelet z jiného pracoviště

Druh pelet	Popelnatost [%]	Ztráta žháním [°C]
Šťovík	5,18	800
Slunečnice	4,20	550
Čistá sláma	6,02	800
Svitoh	1,32	550
Dřevo	0,32	550
Sláma + kal	29,05	800
Kakaové slupky	6,39	800
Čistý digestát	11,31	800
Smrk + digestát	2,70	800

Jak lze vidět v Tabulce 22, některá paliva byla žhána teplotou 550 °C a jiné vyšší teplotou 800 °C. Porovnáním obou tabulek pro obsah popela lze vyvodit, že šťovík, slunečnice a čistá sláma vykazují téměř stejné hodnoty, které navíc souhlasí s praxí. Ostatní vzorky se rozestupují poněkud více. V tabulce 22 se objevují hodnoty procentuálního zastoupení popela v palivu nižší, to může být spojeno právě se zvýšenou teplotou a optimálnějším rozložením paliva v žhací peci.

6.1.3 Spalné teplo a výhřevnost pelet

Pro zjištění spalného tepla pelet byl použit kalorimetr, který bohužel po několika měření začal vykazovat jistou poruchovost a bylo nutné použít jinou metodu, každopádně tato metoda byla odzkoušena.

V případě poškozeného kalorimetru se spalné teplo určovalo výpočtem (empiricky) z elementárního rozboru pelet. Výsledné spalné teplo je průměrem deseti empirických vztahů. Výhřevnost se následně určila podle vztahu (1). Tento výpočet prováděla spolupracující laboratoř. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty pro spalné teplo a výhřevnost pelet.

Tabulka 23 Spalné teplo a výhřevnost pelet

Druh pelet	Spalné teplo [MJ/kg]	Výhřevnost [MJ/kg]
Šťovík	16,211	14,925
Slunečnice	17,699	16,391
Čistá sláma	16,151	14,875
Svitoh	17,759	16,452
Dřevo	18,238	16,904
60 Sláma +40 kal	13,599	12,672
Kakaové slupky	18,073	16,715
Energokompost	12,55	ND
Čistý digestát	15,769	14,575
Smrk + digestát	17,565	16,223

Z tabulky 22 je patrné, že největší výhřevnost jeví dřevo, hned za tím se nachází kakaové slupky pelety značky Svitho a pelety ze slunečnice. Nejmenší výhřevnost pak patří kombinaci slámy s kalem, která je na hranici 12,5 MJ/Kg.

6.2 Optimální podmínky spalování

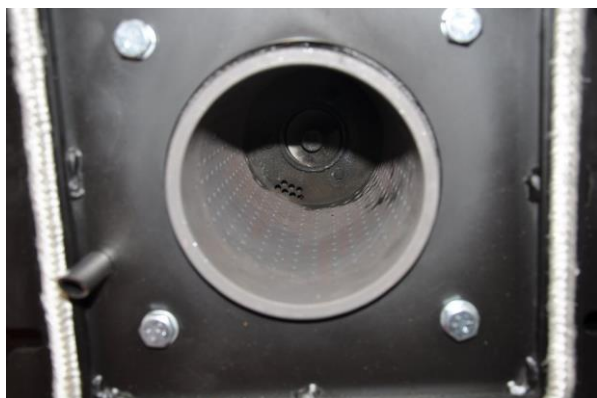
Jelikož je tato práce vedena ve smyslu zjišťování a redukce emisí TZL při spalování alternativních paliv, bude i tato kapitola spíše pojednávat o konstrukčních opatřeních proti vzniku emisí prachu, nežli o optimálním přebytku vzduchu ve spalovací komoře.

Kotel na spalování agropelet musí splňovat několik kritérií, tj. kvalitní hořák a zajištění přísunu paliva (šnekový dopravník), odvod strusky, regulace teploty. Pro velmi efektivní záchyt TZL může být kotel strukturován jako dvou, nebo třítahový, popřípadě s vestavěnými deflektory.

Hořák na pelety

Na trhu se objevuje speciální rotační hořák, který je certifikován speciálně na rostlinné pelety. Jedná se o rotační hořák MultiBio. Otáčením celého hořáku promíchává prohořelé palivo a odvádí popel, což zvyšuje účinnost hořáku a snižuje nedopal. Konstrukce válcové rotační spalovací komory případné spečence v průběhu hoření odvaluje do prostoru popelníku a neobtěžuje tím obsluhu kotle. Spékavý agro materiál a dřevěné pelety nejnižší kvality s vysokým obsahem kůry zpravidla není možné bezproblémově, certifikovaně spalovat v hořácích jednoduché nebo retortové konstrukce [37].

Odlišný typ hořáku představil v prototypu slovenský výrobce VERNER SK. Jedná se o pohyblivý deskový hořák nové konstrukce, jehož vývoj byl založen na poznatcích předchozích modelů automatických kotlů VERNER A251 a A501. Hořák bude zajišťovat v předem nastavených cyklech pohyb paliva na roštu a jeho dokonalé prohořívání. Tento hořákový systém je navržen i pro paliva, která se při hoření spékají. Palivo je automaticky zapalováno elektrickým horkovzdušným systémem. Vzduch potřebný pro hoření paliva dodávají dva vícestupňové přetlakové ventilátory [38].



Obrázek 4 Rotační hořák[38]



Obrázek 5 Posuvný hořák[38]

Konstrukce komory

Toto opatření závisí především na tom, aby co největší množství úletového popílku zůstalo v kotli a neodcházelo do komína. Proto se třítahový kotel jeví jako vhodné řešení.

Deflektory

Pro zlepšení spalování a snížení úletové prašnosti nad hořákem může být instalován žáruvzdorný keramický deflektor, který navíc usměrňuje tok spalin přes výměník a minimalizuje škodliviny ve spalinách [39].

6.3 Měření produkce TZL agropelet na kotli VERNER A251.1

K měření byl dodán automatický kotel značky Verner s označením A251.1 s výkonem 25 kW a emisní třídou 3. Tento kotel byl vyroben v roce 2008. V dnešní době firma Verner prodává kotel s označením A251 se stejným výkonem a emisní třídou 5 [40].



Obrázek 6 Ukázka ovládacího panelu kotle VERNER

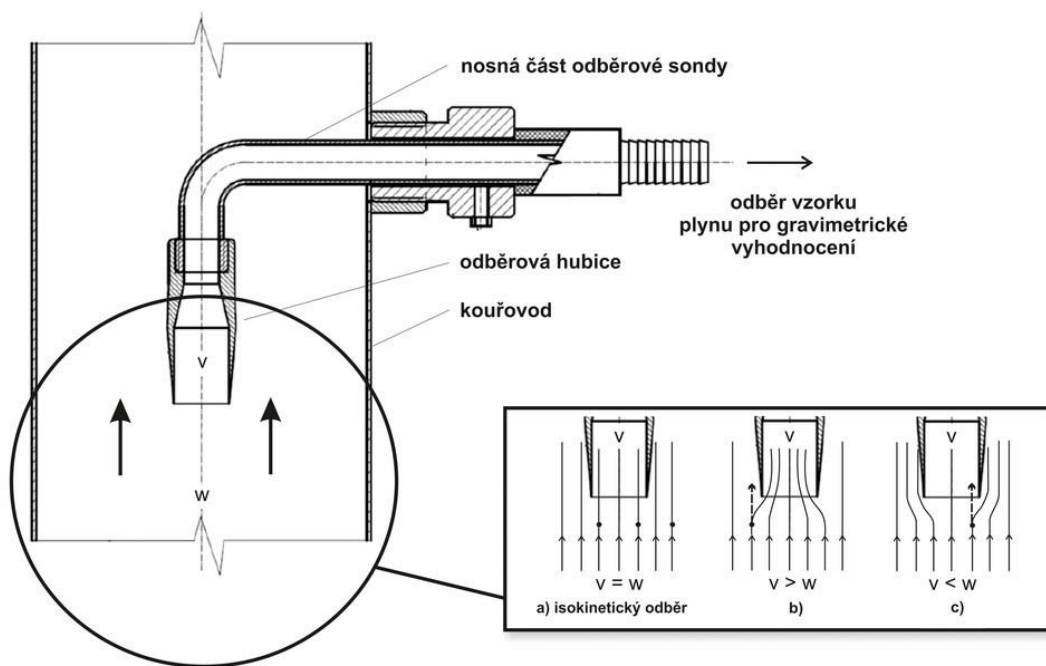
Pro ověření byly dodány 4 druhy agropelet: seno, řepka, pšenice, semínka (z řepky, slunečnice, hořčice a plevy).

6.3.1 Popis experimentu

Jako hlavní měření bylo zjistit obsah prachu vystupující z komína, ale během toho se měřili také plynné emise. Pro obsah TZL byla použita izokinetická gravimetrická metoda (GTE), pro kyslík posloužila metoda paramagnetické měření koncentrace kyslíku a pro zbylé plyny byla použita metoda infračervená spektroskopie. Pro měření plynných emisí však postačil jediný analyzátor od firmy Siemens.

Izokinetická gravimetrická metoda

Její princip závisí na tzv. izokinetickém naředěném odběru vzorku plynu za spalovacím zařízením. Naředění spalin se provádí kvůli zvýšení rychlosti plynu za spalovacím zařízením. Dále ke zmenšení koncentrace prachu, aby nedošlo k rychlému zanesení filtru a v neposlední řadě slouží ke snížení teploty spalin a kondenzaci některých uhlovodíků na částech prachu [26].



Obrázek 7 Schéma izokinetického odběru[26]

Izokinetický odběr se dosáhne právě tehdy, kdy rychlost spalin v kouřovodu bude stejná jako rychlost spalin proudících do odběrové hubice. Rychlost spalin (w) v kouřovodu se zjistila pomocí vrtulkového anemometru Testo 350 - XL. Rychlost spalin proudících do hubice (v) se zjistila z rovnice:

$$v = Q/S[\text{m/s}] \quad (2)$$

Kde Q - průtok plynu přes měřicí stanici
 S - průřez hadice (15 mm)

Plyn dále proudil hadicí skrz filtrační vatu, která se před umístěním do odběrové hadice musela vysušit (kvůli odstranění vlhkosti) a posléze zvážit. Průtok plynu Q se postupně se zanášejícím filtrem zmenšoval, proto bylo třeba pomocí vývěvy seškrtit ventil, aby se průtok zvětšil a odběrová rychlost byla opět izokinetická. Škrcení ventilu nebylo možné provádět donekonečna a proto, když průtok klesl pod kritickou úroveň, tak se měření zastavilo.



Obrázek 8 Vrtulkový anemometr Testo

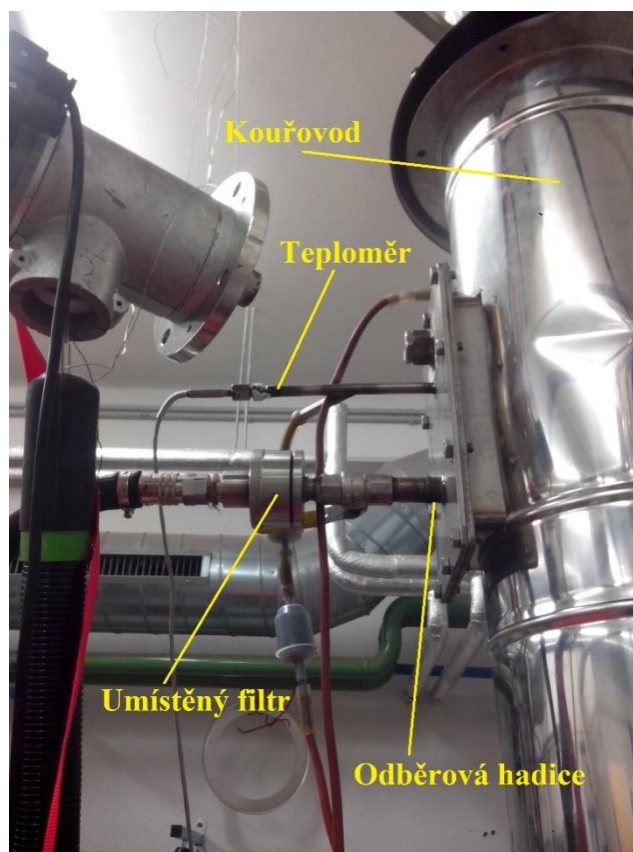


Obrázek 9 Průtoková měřicí stanice

Průtoková měřicí stanice je uprostřed opatřena průtokoměrem, na kterém bylo nutné udržovat průtok 18 l/min k dodržení izokinetického odběru.



Obrázek 10 Kouřovod



Obrázek 11 Detail odběrového místa

Před měřením se odečetl stav plynoměru na měřicí stanici a zapsal se čas, podle kterého se následně z počítače vytáhly data teploty a tlaku v kouřovodu. Po ukončení odběru se zapsal čas a stav plynoměru, následně bylo potřeba vysadit odběrovou hubici a vyjmout filtr ke zvážení. Během měření TZL byl nepřetržitě v provozu ULTRAMAT (měřič koncentrací plynu v kouřovodu). Hodnoty se zapisovali do předpřipravené tabulky na další straně.



Obrázek 12 Ukázka vyjmutých filtrů
(8,9 seno, 10,11 -řepka, 12,1 -pšenice, 2,3 -čisté)



Obrázek 13 Siemens ULTRAMAT (měření O₂, CO₂, CO, NO_x)

Tabulka 24 Naměřené hodnoty pro výpočet koncentrace TZL

Podmínky měření-TZL									
číslo vzorku		8	9	10	11	12	1	2	3
palivo		seno		řepka		pšenice		semínka	
filtr suchý s miskou [g]	m ₁	33,5203	34,5315	33,7711	35,8036	34,8033	33,9272	34,2124	34,0018
filtr po měření [g]	m ₂							34,2637	34,0567
začátek odběru	T ₁	10:46	11:05	13:49	14:12	15:26	15:52	10:11	10:35
konec odběru	T ₂	11:03	11:22	14:09	14:30	15:46	16:14	10:33	10:58
doba odběru [min]	T	17	17	20	18	20	22	22	23
Hubice [mm ²]	H	15	15	15	15	15	15	15	15
rychlost v potrubí [m/s]	v	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
atmosférický tlak [Pa]	p _a	98200	98200	98200	98200	98200	98200	98200	98200
* ⁷ teplota plynu v potrubí [°C]	t _{sp}	226,7	234,1	249,80	253,35	224,95	248,57	241,84	207,93
*statický tlak v potrubí [Pa]	p _s	16,07	15,67	15,57	15,34	16,09	14,45	16,88	16,48
**medián koncentrace O ₂ [%]	O ₂	10,59	10,95	10,50	10,41	8,10	10,64	10,13	10,045
referenční koncentrace O ₂ [%]	O _{2ref}	10	10	10	10	10	10	10	10
Plynoměr									
poč. stav [m ³]	V ₁	97,06	97,287	97,501	97,77	97,997	98,265	98,797	99,107
kon. stav [m ³]	V ₂	97,2865	97,287	97,77	97,3997	98,265	98,549	99,107	99,413

⁷ * - hodnota získaná z počítače

** - hodnota získaná z ULTRAMATU

6.4 Vyhodnocení emisí jednotlivých měřených paliv

Pro každé palivo byl vyhotoven palivový rozbor, který se prováděl na spolupracující laboratoři. Z hodnot uložených v počítači napojeném na měřicí stanici a ULTRAMATU se vyhotovily grafy závislosti (CO , NO_x , O_2 , t_{sp} , P_{kotle}) na čase. K těmto grafům bylo potřeba vypočítat tzv. hodnoty CO_{ref} a $\text{NO}_{x\text{ref}}$ pro referenční obsah kyslíku (10 %), aby nedocházelo k ředění škodlivin vzduchem. Výpočet se provedl podle vztahu [35]:

$$X_{\text{ref}} = X_{\text{real}} * \frac{21 - \text{O}_{2\text{ref}}}{21 - \text{O}_{2\text{real}}} \quad (3)$$

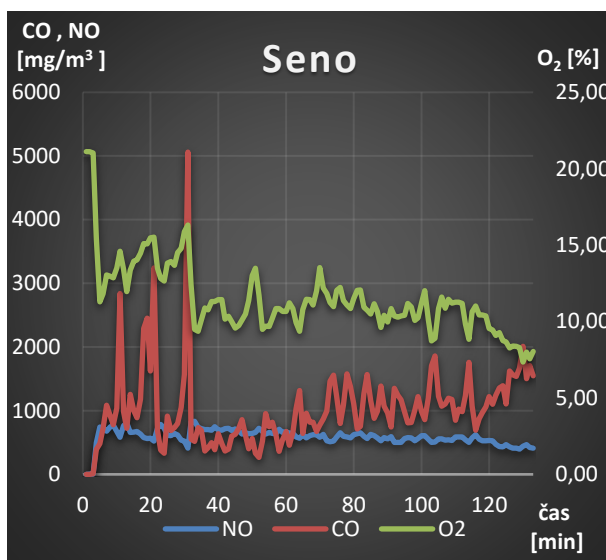
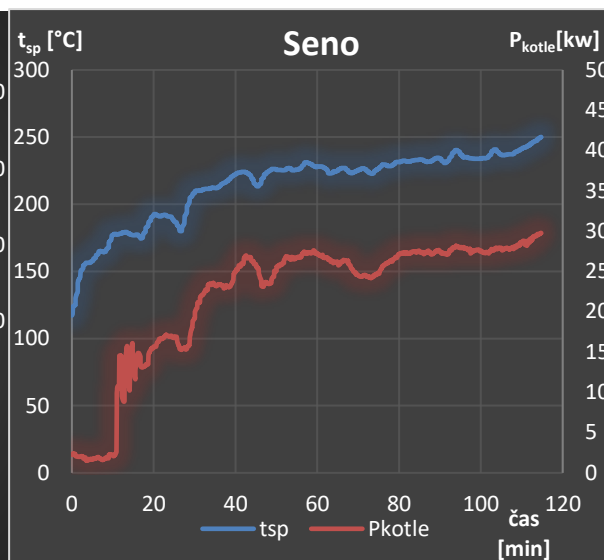
Kde: X_{ref} - Referenční hodnoty (CO_{ref} , $\text{NO}_{x\text{ref}}$)
 X_{real} - Skutečná naměřená hodnota
 $\text{O}_{2\text{ref}}$ - Referenční obsah kyslíku (10 %)
 $\text{O}_{2\text{real}}$ - skutečný naměřený obsah kyslíku
 Konstanta 21 – procentuální podíl kyslíku v atmosféře

Jako první fáze bylo najít optimální proces spalování, který by trval alespoň 90 minut, z těchto 90 minut byly následně vypočteny referenční hodnoty a aritmetický průměr množství emisí. V grafu s referenčními hodnotami je dále znázorněn úsek měření prachu. Pod grafy je potom uvedeno množství emisí TZL pro jedno určité palivo, výpočet byl stanoven dle normy ČSN EN 13284-1 a ČSN ISO 9096 [41].

6.4.1 Pelety ze sena

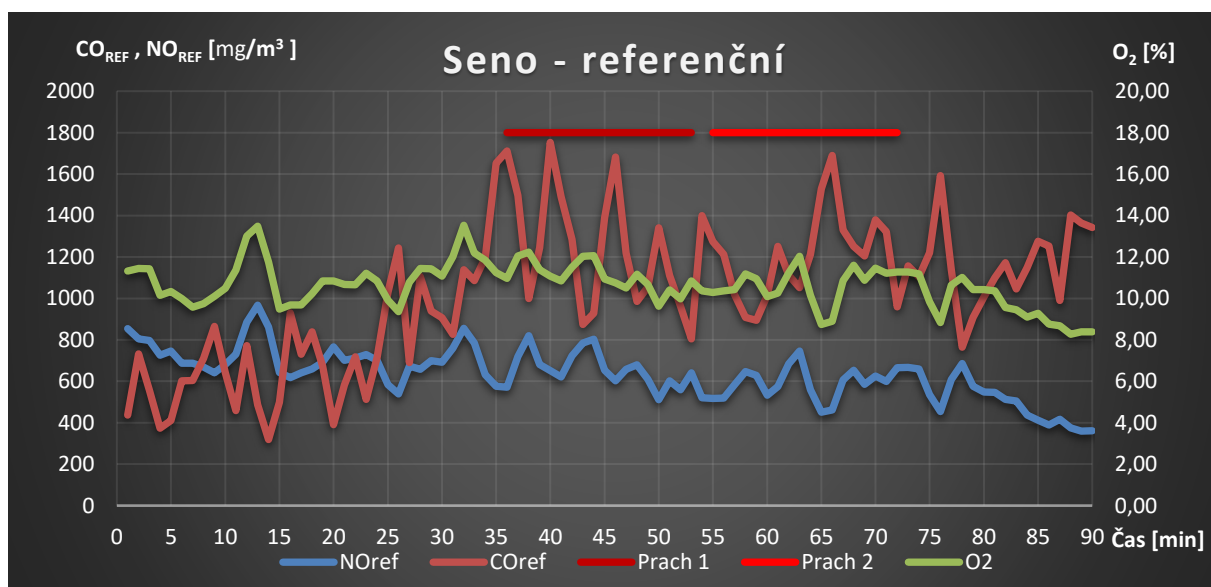
Tabulka 25 Palivový rozbor pelet ze sena určených pro stanovení emisí na kotli Verner A251.1

Vzorek	Seno				
	Vzorek v dodaném stavu			Vzorek bezvodý	Hořlavina vzorku
	hodnota	směrodatná odchylka	interval spolehlivosti	hodnota	hodnota
Voda zbytková [% hm.]	8,90	0,03	0,04	0,00	0,00
Popel [% hm.]	9,35	0,11	0,12	10,27	0,00
Hořlavina h [% hm.]	81,75	-	-	89,73	100,00
Uhlík C [% hm.]	40,67	0,47	0,53	44,64	49,75
Vodík H [% hm.]	5,80	0,13	0,15	5,27	5,87
Dusík N [% hm.]	1,53	0,07	0,07	1,68	1,87
Síra prchavá S [% hm.]	0,06	0,02	0,02	0,07	0,08
Kyslík O [% hm.]	42,59	0,62	0,70	38,07	42,43
Spalné teplo výpočtem [MJ.kg ⁻¹]	15,457	-	-	16,967	18,909
Výhřevnost při 20 °C výpočtem [MJ.kg ⁻¹]	14,186	-	-	15,811	17,621

Graf 1 Závislost emisí CO, NO_x a kyslíku na čase pro seno

Graf 2 Závislost teploty spalin a výkonu na čase pro seno

Ustálené hoření nastalo v čase od 30 do 120 minut a je znázorněno v následujícím grafu pro referenční obsahy NO a CO.



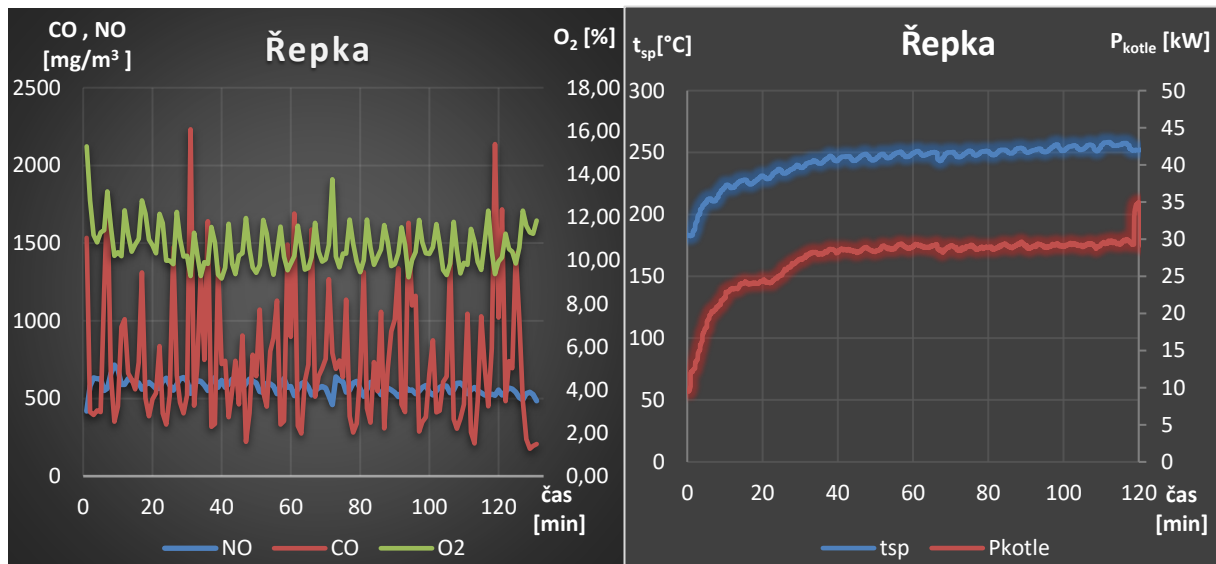
Graf 3 Ustálené měření pro seno

Hodnoty emisí TZL sena Prach 1 vyšly 463,5 [mg/m³] a odběr Prach 2 vyšel 520 [mg/m³]. Průměr pro seno je 491,75 [mg/m³].

6.4.2 Pelety z řepky

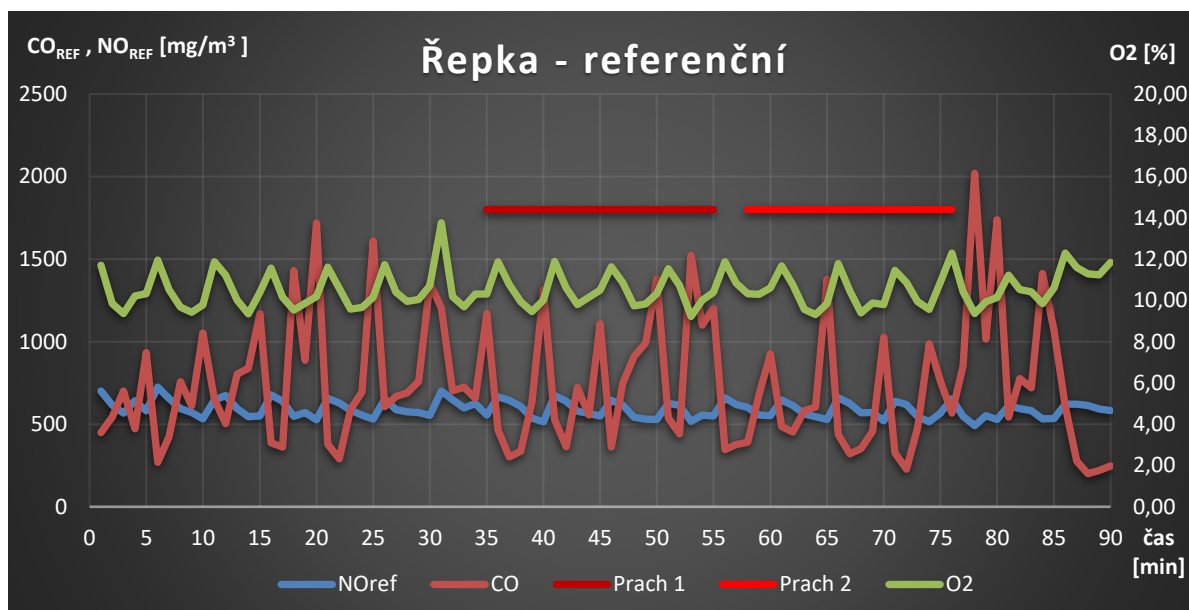
Tabulka 26 Palivový rozbor pelet z řepky určených pro stanovení emisí na kotli Verner A251.1

Vzorek	Řepka				
Parametr	Vzorek v dodaném stavu			Vzorek bezvodý	Hořlavina vzorku
	hodnota	směrodatná odchylka	interval spolehlivosti	hodnota	hodnota
Voda zbytková [% hm.]	10,62	0,08	0,09	0,00	0,00
Popel [% hm.]	4,27	0,01	0,01	4,77	0,00
Hořlavina [% hm.]	85,11	-	-	95,23	100,00
Uhlík C [% hm.]	41,72	0,16	0,19	46,68	49,02
Vodík H [% hm.]	6,10	0,04	0,04	5,50	5,77
Dusík N [% hm.]	0,69	0,04	0,04	0,78	0,82
Síra prchavá S [% hm.]	0,20	0,11	0,12	0,22	0,23
Kyslík O [% hm.]	47,02	0,10	0,11	42,05	44,16
Spalné teplo výpočtem [MJ.kg ⁻¹]	15,572	-	-	17,422	18,296
Výhřevnost při 20 °C výpočtem [MJ.kg ⁻¹]	14,234	-	-	16,217	17,030



Graf 4 Zavislost emisí CO, NOx a kyslíku na čase pro řepku Graf 5 Zavislost teploty spalin a výkonu na čase pro řepku

Ustálené hoření nastalo v čase od 40 do 130 minut a je znázorněno v následujícím grafu pro referenční obsahy NO a CO.



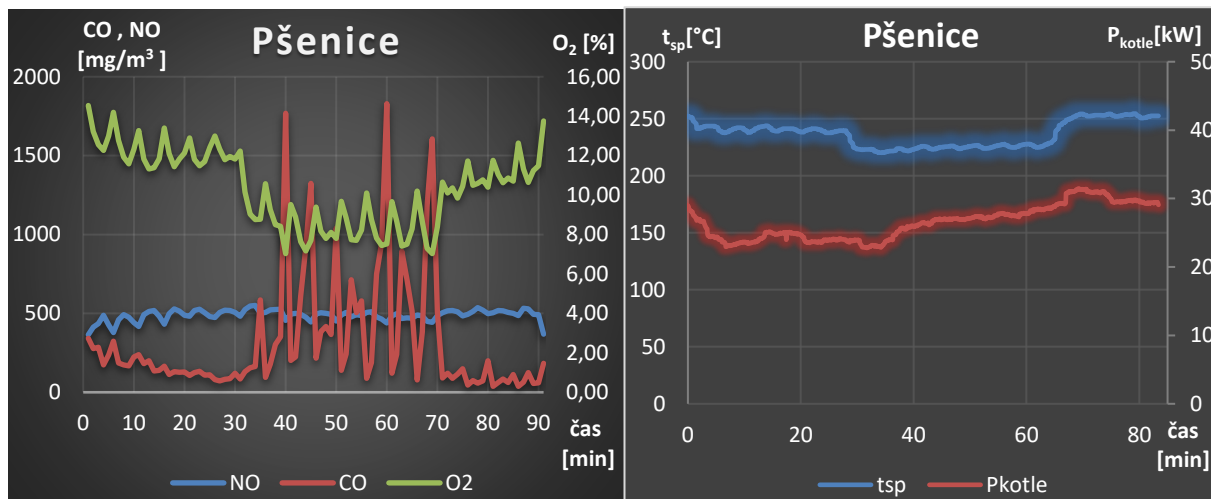
Graf 6 Ustálené měření pro řepku

Hodnoty emisí TZL řepky Prach 1 vyšly 585 [mg/m³] a odběr Prach 2 vyšel 678 [mg/m³]. Průměr pro seno je 631,5 [mg/m³].

6.4.3 Pelety z pšenice

Tabulka 27 Palivový rozbor pelet ze pšenice, určených pro stanovení emisí na kotli Verner A251.1

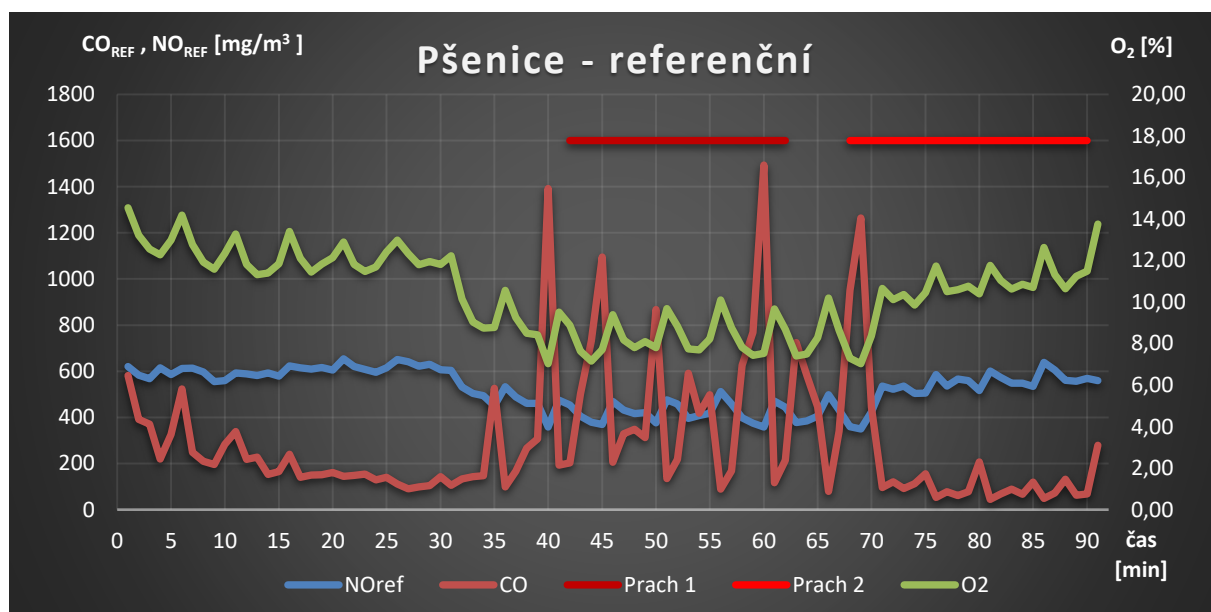
Vzorek	Pšenice sláma				
Parametr	Vzorek v dodaném stavu			Vzorek bezvodý	Hořlavina vzorku
	hodnota	směrodatná odchylka	interval spolehlivosti	hodnota	hodnota
Voda zbytková [% hm.]	11,02	0,06	0,07	0,00	0,00
Popel [% hm.]	4,30	0,25	0,28	4,83	0,00
Hořlavina [% hm.]	84,68	-	-	95,17	100,00
Uhlík C [% hm.]	42,40	0,17	0,19	47,66	50,08
Vodík H [% hm.]	6,02	0,02	0,02	5,38	5,65
Dusík N [% hm.]	0,56	0,02	0,02	0,63	0,66
Síra prchavá S [% hm.]	0,06	0,01	0,02	0,07	0,07
Kyslík O [% hm.]	46,66	0,17	0,19	41,44	43,55
Spalné teplo výpočet [MJ.kg ⁻¹]	15,718	-	-	17,665	18,562
Výhřevnost při 20 °C výpočet [MJ.kg ⁻¹]	14,398	-	-	16,486	17,323



Graf 7 Závislost emisí CO, NOx a kyslíku na čase pro pšenici

Graf 8 Závislost teploty spalin a výkonu na čase pro pšenici

U pšenice se ukázala jistá poruchovost spojená s jejím spékáním, proto se vzal jako referenční celý měřicí úsek 90 min. Hodnoty jsou znázorněny v následujícím grafu pro referenční obsahy NO a CO.



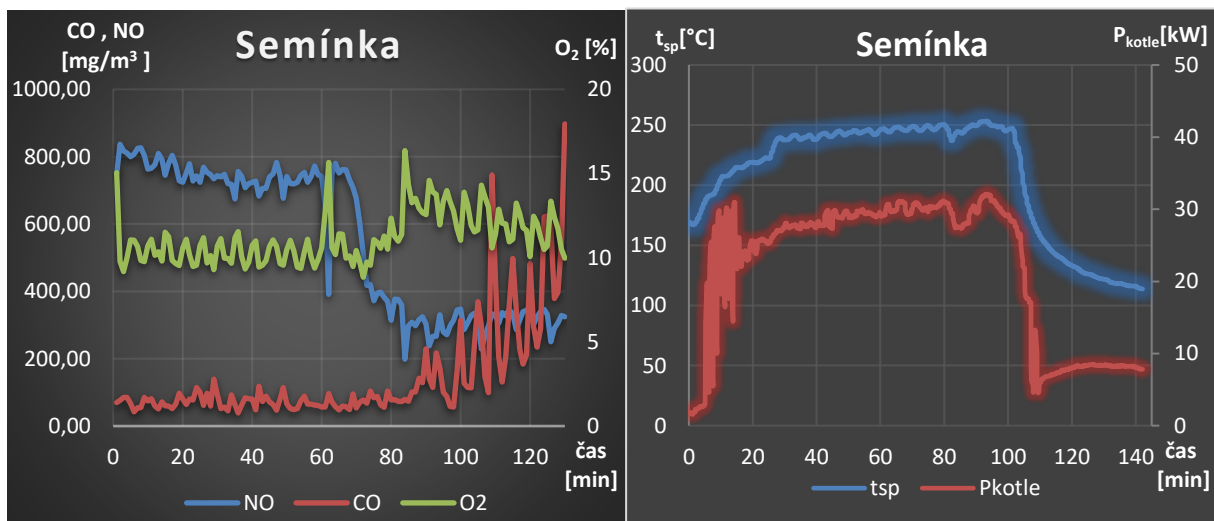
Graf 9 Ustálené měření pro pšenici

Hodnoty emisí TZL pšenice Prach 1 vyšly 217 [mg/m³] a odběr Prach 2 vyšel 301 [mg/m³]. Průměr pro seno je 259 [mg/m³].

6.4.4 Pelety ze semínek (řepky, slunečnice, hořčice, plevy)

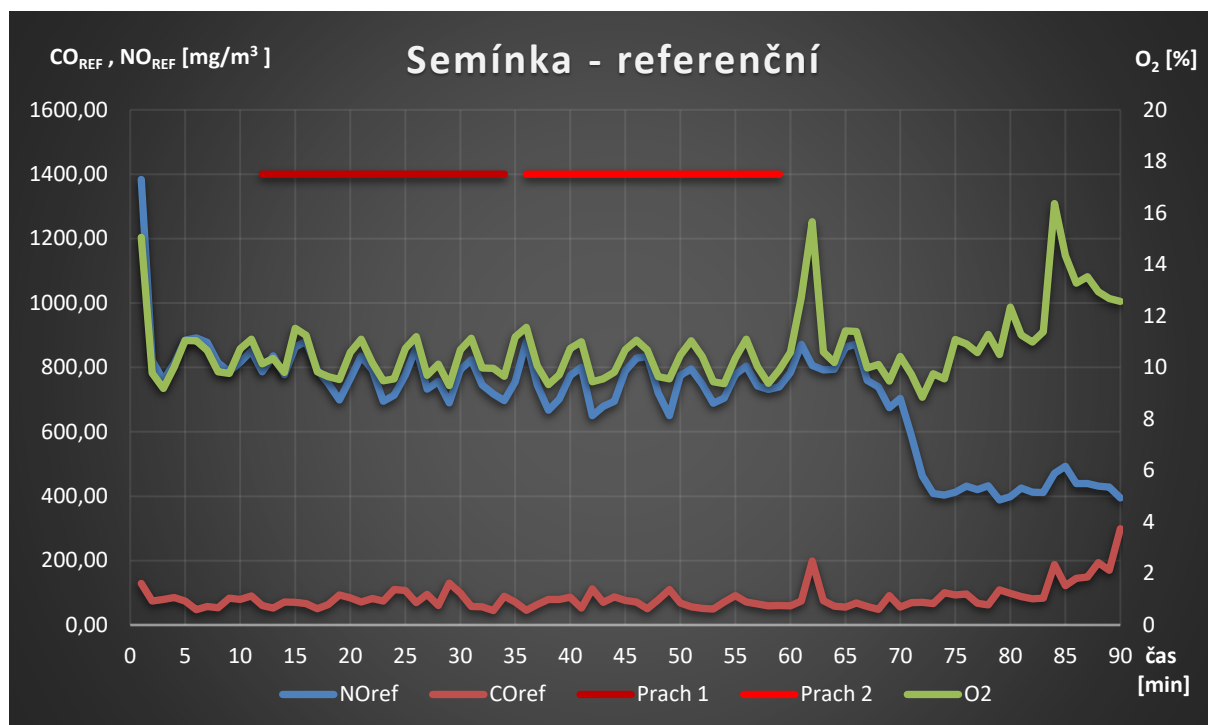
Tabulka 28 Palivový rozbor pelet ze semínek, určených pro stanovení emisí na kotli Verner A251.1

Vzorek	Semínka řepka slunečnice hořčice plevy				
Parametr	Vzorek v dodaném stavu			Vzorek bezvodý	Hořlavina vzorku
	hodnota	směrodatná odchylka	interval spolehlivosti	hodnota	hodnota
Voda zbytková [% hm.]	11,92	0,05	0,06	0,00	0,00
Popel [% hm.]	7,93	0,13	0,15	9,00	0,00
Hořlavina [% hm.]	80,16	-	-	91,00	100,00
Uhlík C [% hm.]	40,35	0,19	0,22	45,81	50,34
Vodík H [% hm.]	5,86	0,07	0,08	5,14	5,65
Dusík N [% hm.]	2,12	0,06	0,06	2,41	2,65
Síra prchavá S [% hm.]	0,16	0,01	0,01	0,18	0,19
Kyslík O [% hm.]	43,58	0,31	0,35	37,46	41,17
Spalné teplo výpočtem [MJ.kg ⁻¹]	15,246	-	-	17,308	19,021
Výhřevnost při 20 °C výpočtem [MJ.kg ⁻¹]	13,961	-	-	16,181	17,782



Graf 10 Závislost emisí CO, NOx a kyslíku na čase pro semínka Graf 11 Závislost teploty spalín a výkonu na čase semínka

Ustálené hoření nastalo v čase od 0 do 90 minut a je znázorněno v následujícím grafu pro referenční obsahy NO a CO.

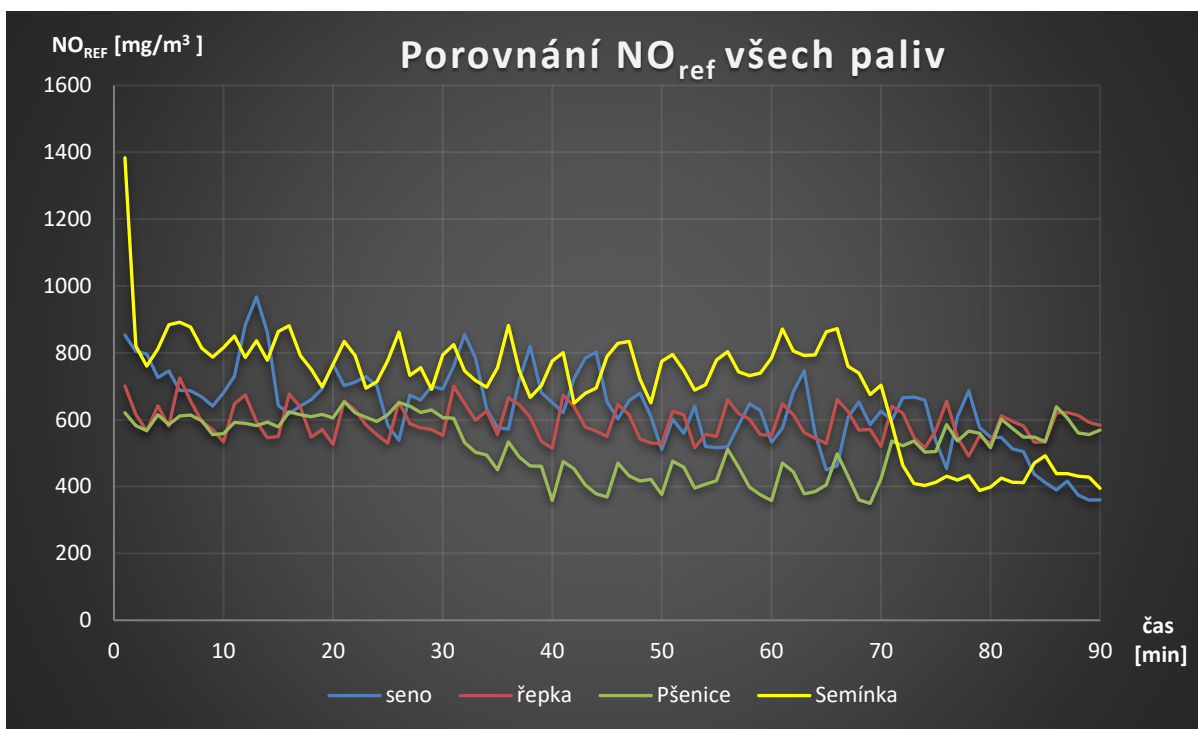
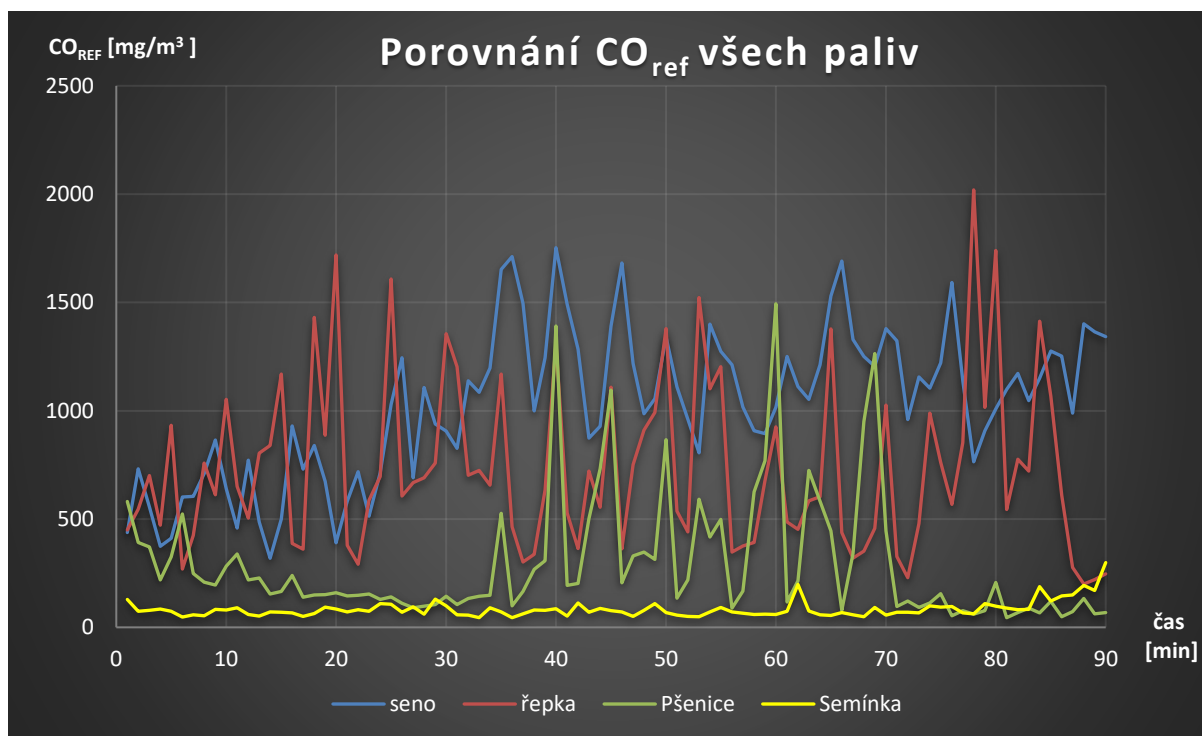


Graf 12 Ustálené měření pro semínka

Hodnoty emisí TZL pšenice Prach 1 vyšly 185 [mg/m³] a odběr Prach 2 vyšel 201 [mg/m³]. Průměr pro seno je 193 [mg/m³].

6.5 Porovnání emisí měřených paliv společně se dřevem

V této kapitole budou porovnány plynné emise měřených paliv v grafech, dále budou uvedeny průměrné referenční hodnoty emisí, CO a NO, průměrné hodnoty TZL, teplota spalin a průměrný výkon kotle. Pro porovnání se zde budou vyskytovat i hodnoty pro dřevo převzaté z práce Ing. Sedláčka. Referenční hodnoty budou porovnány s emisními limity a budou vyvozeny závěry [35].

Graf 13 Porovnání NO_{ref} všech palivGraf 14 Porovnání CO_{ref} všech paliv

Tabulka 29 Výsledné srovnání paliv

Palivo	NO [mg/m ³]	CO [mg/m ³]	O ₂ [%]	NO _{ref} [mg/m ³]	CO _{ref} [mg/m ³]	TZL [mg/m ³]	t _{sp} [°C]	P _{kotle} [kW]
seno	592,25	1011,48	11,55	635,08	1030,06	491,75	214,70	22,08
řepka	560,75	732,41	10,65	613,49	738,46	631,50	242,66	27,29
pšenice	488,02	314,33	10,37	519,79	295,69	259,00	236,26	26,53
semínka	552,61	143,62	11,19	705,70	84,33	193,00	238,48	27,90
dřevo	413,04	48,73	7,89	346,49	40,88	8,5	202,72	27,1

Tabulka 30 Emisní limity pro kotle

Dávka paliva	palivo	jmenovitý výkon [kW]	Mezní hodnoty emisí					
			TZL [mg/m ³]			CO [mg/m ³] při 10 % O ₂		
			třída 3	třída 4	třída 5	třída 3	třída 4	třída 5
Samočinná	biogenní	0-50	150	60	40	3000	1000	500
		50-150				2500		
		150-500				1200		



Graf 15 Výsledné porovnání emisí TZL všech paliv

Měřením čtyř druhů alternativních paliv na kotli Verner jsme dostali jisté výsledky, které nyní budou shrnuty.

Nejprve se věnujme spékání jednotlivých paliv. V tomto testu nejlépe obstála řepka, která se nespékala, nejhůře na tom bylo naopak seno, které se speklo a bylo potřeba manuálně strusku odstranit z roštu, z tohoto pohledu je tento typ paliva zcela nevyhovující. U zbylých dvou druhů (pšenice a semínka) ke spékání docházelo, ale vytvořená struska odcházela sama po roštu do popelníku.



Obrázek 14 spečenec sena



Obrázek 15 Struska pšenice



Obrázek 16 Rošt kotle při spékání sena

Z hlediska emisí CO pro referenční hodnoty a emisní třídu kotle 3 prošly všechny čtyři paliva. Svými hodnotami pod 500 [mg/m³] splňuje pšenice i semínka požadavky emisní třídy kotle 5. Semínka vykazují 2x větší koncentraci CO než dřevo.

Horší je to s emisemi TZL, kde bohužel ani jedno palivo nesplnilo daný limit 150 [mg/m³]. Jako nejmenší hodnoty se jeví opět semínka s koncentrací 193 [mg/m³], dřevo oproti tomu vykazuje více jak 20x menší koncentrace TZL.

Žádné testované palivo nesplnilo požadavky dané emisním limitem pro emise TZL. Z tohoto pohledu je nutné stanovit různá opatření jak ze strany paliva, tak ze strany kotle.

Závěr

Tato práce se dělí na dvě části. První z nich se zabývá rešerší paliva. Určení hlavních vlastností pelet (vlhkost, výhřevnost, hořlavina, popelovina, teplota tavení popele, obsahy prvků) a jak lze tyto vlastnosti určit. Dále je zde uvedeno několik druhů alternativních materiálů pro výrobu agropelet, u kterých je uveden hrubý a elementární rozbor pro možnost porovnání se stejným materiálem odlišného výskytu.

Porovnání paliva z experimentální části s částí rešeršní tak vychází pro měřenou pšenici větší vlhkost o 1,5 % to má za následek snížení výhřevnosti o zhruba 1 MJ/kg, popelnatost je téměř stejná 4.5 %.

Pro řepku platí o 1 % větší vlhkost, ale menší popelnatost i menší výhřevnost o 0,7 MJ/kg, znovu z důvodu větší vlhkosti. Poslední data, která jsou k dispozici, jsou pro seno, které překvapilo menší vlhkostí o 1 %, ale téměř o 4,5 % větším obsahem popeloviny. V důsledku toho klesla i výhřevnost o 1,7 MJ/kg.

Ve druhé části se prakticky ověřovala koncentrace emisí plynů a TZL ve spalínách. Obecně lze říci, že všechna paliva splnila limity pro plynné znečištění a žádné z nich nesplnilo emisní limit pro koncentraci prachu ve spalínách při referenčních podmínkách 10 % kyslíku.

V podkapitole 5.2 TZL jsou uvedeny výsledky z jiných měření na odlišných místech a nyní bude stanoveno porovnání. Musí se vzít ale v potaz, že tyto hodnoty nejsou vždy stanoveny pro referenční obsah kyslíku ve spalínách 10 %.

Měření z laboratoře Poznan University of Technology vykazuje stejné hodnoty pro dřevo 8 [mg/m³]. Pro seno je koncentrace více jak 10krát menší, činí pouze 45 [mg/m³]. Není uvedeno, o jakou emisní třídu kotle se jedná. Takto nízké emise mohou být způsobeny i menším výkonem kotle, tzn. menší spotřeba paliva. Toto palivo může být také kvalitnější.

Měření na německém kotli Heizomat RHK-AK 50 vykazuje dvakrát větší emise TZL u dřeva tj. 17 [mg/m³]. U pšenice je hodnota poloviční 129 [mg/m³].

Měření dánského technologického institutu odhalilo emise TZL u dřeva 35 [mg/m³], tedy opět vyšší a vyšší emise byli změřeny i pro pšenici a obilná zrna 337 [mg/m³]. Oproti našim 193 [mg/m³] toto může být způsobeno právě přidavkem 5 % vápenné mouky pro zvýšení teploty tavení popele.

Měření v Praze na kotli VERNER A25 ukazuje na velmi podobné výsledky. Co se týká pšenice, ta je o pouhých 22 [mg/m³] vyšší, tedy 281 [mg/m³]. A alternativní pelety, složené z podobného materiálu jako naše semínka jsou o 27 [mg/m³] nižší, ale opět hodnota 166 [mg/m³] nesplňuje ani emisní 3. třídu kotle.

Seznam použitých zdrojů

- [1] *Akční plán pro biomasu v ČR na období 2012-2020: schválený vládou ČR dne 12.9.2012 pod č. j. 920/12* [online]. Praha: Ministerstvo zemědělství, 2012 [cit. 2017-05-10]. ISBN 978-80-7434-074-1.
- [2] *SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2009/28/ES*. In: . Brusel: Parlament EU, 2009, ročník 2009, Číslo předpisu 28/2009.
- [3] PASTOREK, Zdeněk, Jaroslav KÁRA a Petr JEVIČ. *Biomasa obnovitelný zdroj energie*. 1. Praha 8: FCC PUBLIC, 2004. ISBN 80-86534-06-5.
- [4] *Vyhláška o stanovení druhů a parametrů podporovaných obnovitelných zdrojů pro výrobu elektřiny, tepla nebo biometanu a o stanovení a uchovávání dokumentů*. In: . Praha: MUDr. Kuba v. r., 2013, ročník 2013, č. 477/2012 Sb.
- [5] KLOBUŠNÍK, Lubomír. *Pelety palivo budoucnosti*. 1. České Budějovice: Sdružení harmonie, 2003. ISBN 80-239-1956-3.
- [6] Česká peleta. *Http://www.ceska-peleta.cz/: zdravě komfortní palivo* [online]. b.r. [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: <http://www.ceska-peleta.cz/pelety-brikety-drevo/pelety/>
- [7] BIOM. *Biom.cz: biomasa, biopaliva, bioplyn, pelety, kompostování a jejich využití* [online]. b.r. [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/alternativni-pelety>
- [8] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4770-7.
- [9] BALÁŠ, Marek. Měření vlhkosti paliv. In: *Http://biom.cz* [online]. Praha 1: České sdružení pro biomasu, 2011 [cit. 2017-02-04]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/mereni-vlhkosti-paliv>
- [10] LYČKA, Zdeněk. *Dřevní peleta II: spalování v malých zdrojích tepla*. 1. vyd. Krnov: LING Vydavatelství, 2011. ISBN 978-80-904914-1-0.
- [11] Popel z biomasy – významný zdroj živin. *Http://biom.cz* [online]. Praha 1: České sdružení pro biomasu, 2015 [cit. 2017-02-04]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/popel-z-biomasy-vyznamny-zdroj-zivin>
- [12] Metody zkoušení fyzikálně-chemických vlastností tuhých biopaliv. *Http://biom.cz* [online]. Praha 1: České sdružení pro biomasu, 2010 [cit. 2017-02-04]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/metody-zkouseni-fyzikalne-chemickych-vlastnosti-tuhych-biopaliv>
- [13] HORÁK, Jiří. Chemické listy. *Chemické listy* [online]. 2013, **2013**(107), 502-509 [cit. 2017-02-05]. ISSN 0009-2770. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2013_06_502-509.pdf
- [14] Vliv prvků na charakteristické teploty popele. *Http://vytapani.tzb-info.cz* [online]. Praha 6: Topinfo s.r.o., 2012 [cit. 2017-02-05]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/teorie-a-schemata/8382-kotle-1-cast>
- [15] Biomasa – alternativní palivo z hlediska chemického složení. *Http://biom.cz* [online]. Praha 1: České sdružení pro biomasu, 2007 [cit. 2017-02-05]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/biomasa-alternativni-palivo-z-hlediska-chemickeho-slozeni>

-
- [16] *EKOVER* [online]. Březovice: Družstvo EKOVER, 2017 [cit. 2017-01-22]. Dostupné z: <http://www.ekover.cz/>
- [17] Tuhá biopaliva z místních zdrojů. *Http://biom.cz* [online]. Praha 1: České sdružení pro biomasu, 2010 [cit. 2017-02-06]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/tuha-biopaliva-z-mistnich-zdroju>
- [18] *Osevní plochy ozimých plodin* [online]. Praha 10: Český statistický úřad, 2016 [cit. 2017-02-06]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/osevni-plochy-ozimych-plodin-pro-sklizen-v-roce-2016>
- [19] SKÁLA, Zdeněk a Tadeáš OCHODEK. *Energetické parametry biomasy* [online]. Brno, 2007 [cit. 2017-02-04]. Dostupné z: <http://www.eu.fme.vutbr.cz/uploads/OEI/enparbio.pdf>
- [20] Vlastnosti šťovíku. In: *Http://oze.tzb-info.cz* [online]. Praha 6: Topinfo s.r.o, 2017 [cit. 2017-02-04]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/biomasa/7779-energeticke-uplatneni-krmneho-stoviku>
- [21] Obnovitelné zdroje: Biomasa. *TZB* [online]. Brno: RICHARD, 2016 [cit. 2016-11-13]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/>
- [22] Trávy jako obnovitelné zdroje energie se zřetelem na spalování. *Http://oze.tzb-info.cz* [online]. Praha 6: Topinfo s.r.o., 2014 [cit. 2017-02-07]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/biomasa/11599-travy-jako-obnovitelne-zdroje-energie-se-zretelem-na-spalovani>
- [23] Význam popelovin v travní biomase pro energetické účely. *Http://biom.cz/cz* [online]. Praha: České sdružení pro biomasu, 2013 [cit. 2017-02-16]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyznam-popelovin-v-travni-biomase-pro-energeticke-ucely>
- [24] *Kvalita ovzduší* [online]. Praha 10: Ministerstvo životního prostředí, 2016 [cit. 2017-02-05]. Dostupné z: <http://www.mzp.cz/>
- [25] MACHNÍKOVÁ, Eva, Martin KOUTSKÝ, František HRDLÍČKA a Jan VOŠTA. Spalování biomasy v krbových kamnech, účinnost a emise. *Chemické listy* [<http://www.chemicke-listy.cz>]. 2003, **97**(3), 171-178 [cit. 2017-02-15]. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/common/content-issue_3-volume_97-year_2003.html
- [26] Emise prachu z malých spalovacích zařízení na tuhá paliva a metody jejich stanovení. *Http://vytapieni.tzb-info.cz* [online]. Praha: Topinfo s.r.o., 2013 [cit. 2017-02-15]. Dostupné z: <http://vytapieni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/9536-emise-prachu-z-malych-spalovacich-zarizeni-na-tuha-paliva-a-metody-jejich-stanoveni>
- [27] KOLONIČNÝ, Jan, Jiří HORÁK a Silvie PETRÁNKOVÁ ŠEVČÍKOVÁ. *Kotle malých výkonů na pevná paliva*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2542-7.
- [28] JUSZCZAK, Marek a Katarzyna LOSSY. Pollutant emission from a heat station supplied with agriculture biomass and wood pellet mixture. *Chemical and Process Engineering* [online]. 2012, **33**(2), 233-234 [cit. 2017-05-08]. DOI: 10.2478/v10176-012-0020-3. ISSN 0208-6425. Dostupné z: <http://www.degruyter.com/view/j/cpe.2012.33.issue-2/v10176-012-0020-3/v10176-012-0020-3.xml>
- [29] Straw and grain fuels for residential heating. *LANDTECHNIK* [online]. 2008, **63**(1), 32-33 [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: <https://www.landtechnik-online.eu/ojs-2.4.5/index.php/landtechnik/article/view/2008-1-032-033/1213>
- [30] HARVEY, Richard. *Potential use of combinable crop biomass as fuel for small heating*
-

- boilers* [online]. In: . 2007, s. 20-21 [cit. 2017-05-08].
- [31] *Spalovací zkoušky vybraných tuhých paliv v kotli VERNER A25* [online]. Brno, 2006 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/41956940-Spalovaci-zkousky-vybranych-tuhych-paliv-v-kotli-verner-a25.html>
- [32] VERMA, V.K., S. BRAM, F. DELATTIN, P. LAHA, I. VANDENDAEL, A. HUBIN a J. DE RUYCK. Agro-pellets for domestic heating boilers: Standard laboratory and real life performance. In: *Applied Energy* [online]. 2012, **90**(1), s. 17-23 [cit. 2017-05-09]. DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.12.079. ISSN 03062619. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030626191100002X>
- [33] Peletování slámy. <Http://www.agronavigator.cz/> [http://www.agronavigator.cz/default.asp?ids=411&ch]. 2005 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.agronavigator.cz/default.asp?ids=411&ch=1&typ=1&val=32010>
- [34] Emisní bilance České republiky 2014. <Http://portal.chmi.cz/> [online]. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2014 [cit. 2017-02-05]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/oez/embil/14embil/rezzo3/rezzo3_CZ.html
- [35] SEDLÁČEK, Daniel. *ANALÝZA ENERGETICKÉHO VYUŽITÍ KÁVOVÝCH PELET*. BRNO, 2016.
- [36] HORÁK, JAKUB. *MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ TUHÝCH A KAPALNÝCH PALIV (BIOPALIV)*. BRNO, 2013.
- [37] Hořák na agropelety. <Http://www.horakypetrojet.cz> [online]. 2017 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.horakypetrojet.cz/horak-na-agropelety-30-kw>
- [38] Hořáky. <Http://vytapani.tzb-info.cz/> [online]. 2015 [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/12450-nove-kotle-na-tuha-paliva-a-jejich-pripravenost-na-podminky-legislativy-a-dotaci>
- [39] *Měření emisí ultrajemných částic z malých spalovacích zařízení se zřetelem na nové poznatky z výzkumu bezpečnosti nanočástic* [online]. Ostrava, 2015 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://vec.vsb.cz/smokeman/katalog-obrazku/clanek-32/443-dra156-fbi-p3908-3908v009-2015.pdf>
- [40] VERNER [online]. Bratislava, 2017 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://www.kotle-verner.cz/>
- [41] *Metody měření emisí tuhých látek ve spalínách* [online]. Brno, Tomáš Bašta [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=103645

Seznam použitých zkratek a symbolů

AAS	Atomová absorpční spektrometrie	
A ^r	Popelovina	[%]
CO	Oxid uhelnatý	
CO ₂	Oxid uhličitý	
COS	Karbonylsulfid	
d	Palivo v bezvodém stavu	
daf	Hořlavina vzorku	
ES	Evropské společenství	
h	Hořlavina	[%]
H ₂ S	Sulfan	
ND	Nedefinováno	
NO _x	Oxidy dusíku	
PAH	Polycyklické aromatické uhlovodíky	
PCB	Polychlorované bifenylly	
PCDD	Polychlorované dibenzo-p-dioxiny	
PCDF	Polychlorované dibenzofurany	
P _{kotle}	Výkon kotle	[W]
POP	Perzistentní organické látky	
Ppm	Part per milion	
Q	Průtok plynu přes měřicí stanici	[l/min]
Q _i ^r	Výhřevnost	[kJ.kg ⁻¹]
Q _s	Spalné teplo	[kJ.kg ⁻¹]
r	Palivo v dodaném stavu	
r	Výparné kondenzační teplo vody	[kJ.kg ⁻¹]
REZZO	Registr emisí a zdrojů znečišťování ovzduší	
S	Průřez odběrové hubice	[mm ²]
SO ₂	Oxid siřičitý	
SO ₃	Oxid sírový	
t _a	Teplota měknutí popele	[°C]
t _b	Teplota tání popele	[°C]
t _c	Teplota tečení popele	[°C]
t _s	Teplota sintrace popele	[°C]
t _{sp}	Teplota spalin	[°C]
TTP	Teploty tavitelnosti popele	
TZL	Tuhé znečišťující látky	
VOC	Těkavá organická látka	
W ^r	Voda, vlhkost	[%]

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1 UKÁZKA DŘEVNÍCH PELET [6]	13
OBRÁZEK 2 PELETY Z PŠENIČNÉ SLÁMY S ADITIVEM HNĚDÉHO UHLÍ [17]	21
OBRÁZEK 3 TOPNÉ PELETY ZE ŠTOVÍKU [7]	23
OBRÁZEK 4 ROTAČNÍ HOŘÁK [38].....	36
OBRÁZEK 5 POSUVNÝ HOŘÁK [38]	37
OBRÁZEK 6 UKÁZKA OVLÁDACÍHO PANELU KOTLE VERNER	38
OBRÁZEK 7 SCHÉMA IZOKINETICKÉHO ODBĚRU [26].....	39
OBRÁZEK 8 VRTULKOVÝ ANEMOMETR TESTO	39
OBRÁZEK 9 PRŮTOKOVÁ MĚŘÍCÍ STANICE.....	40
OBRÁZEK 10 KOUŘOVOD	39
OBRÁZEK 11 DETAIL ODBĚROVÉHO MÍSTA	40
OBRÁZEK 12 UKÁZKA VYJMUTÝCH FILTRŮ	40
OBRÁZEK 13 SIEMENS ULTRAMAT(MĚŘENÍ O ₂ ,CO ₂ , CO, NO _x).....	41
OBRÁZEK 14 SPEČENEC SENA.....	51
OBRÁZEK 15 STRUSKA PŠENICE	50
OBRÁZEK 16 ROŠT KOTLE PŘI SPÉKÁNÍ SENA	51

Seznam tabulek

TABULKA 1 HRUBÝ ROZBOR PALIVA PŘED A PO SPÁLENÍ [3, S. 72]	14
TABULKA 2 VLIV PRVKŮ NA CHARAKTERISTICKÉ TEPLoty POPELE [14].....	17
TABULKA 3 PŘEHLED OBSAHŮ SÍRY A CHLORU V BIOMASE[15]	19
TABULKA 4 BILANČNÍ HODNOTY OBILOVIN A ŘEPKY V ČR [17]	21
TABULKA 5 OSEVNÍ PLOCHY OZIMÝCH PLODIN [18].....	21
TABULKA 6 PŘEHLED VLASTNOSTÍ PELET VYROBENÝCH ZE PŠENICE OZIMÉ [19].....	22
TABULKA 7 PŘEHLED VLASTNOSTÍ PELET VYROBENÝCH Z ŘEPKY OLEJNÉ [19, S. 59] 23	
TABULKA 8 PŘEHLED VLASTNOSTÍ PELET VYROBENÝCH ZE ŠŤOVÍKU [19, S. 75].....	24
TABULKA 9 PŘEHLED VLASTNOSTÍ PELET VYROBENÝCH Z KUKUŘICE [19, S. 47]	24
TABULKA 10 PŘEHLED VLASTNOSTÍ PELET VYROBENÝCH Z PSINEČKU [22][17].....	25
TABULKA 11 PŘEHLED VLASTNOSTÍ PELET VYROBENÝCH Z BUKU [19, S. 43]	26
TABULKA 12 POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ AGROPELET.....	26
TABULKA 13 MĚŘENÍ Z LABORATOŘE POZNAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY	28
TABULKA 14 KOTEL HEIZOMAT RHK-AK 50.....	28
TABULKA 15 MĚŘENÍ DÁNSKÉHO TECHNOLOGICKÉHO INSTITUTU.....	29
TABULKA 16 MĚŘENÍ V PRAZE NA KOTLI VERNER A25.....	29
TABULKA 17 REZZO 3–2014 EMISE HLAVNÍCH ZNEČIŠŤUJÍCÍCH LÁTEK V ČESKÉ REPUBLICE PODLE KRAJŮ [34].....	31
TABULKA 18 PŘEHLED POVINNOSTÍ SOUVISEJÍCÍCH S PRODEJEM A PROVOZEM KOTLŮ NA TUHÁ PALIVA PRO VYTÁPĚNÍ DOMÁCNOSTÍ (DO 500 KW) [21]	32
TABULKA 19 EMISNÍ LIMITY KOTLE 3,4,5 TŘÍDY [26]	32
TABULKA 20 VLHKOST URČENÝCH PELET.....	33
TABULKA 21 PŘEHLED POPELNATOSTI PELET	34
TABULKA 22 POROVNÁNÍ POPELNATOSTI PELET Z JINÉHO PRACOVIŠTĚ	35
TABULKA 23 SPALNÉ TEPLo A VÝHŘEVNOST PELET.....	36
TABULKA 24 NAMĚŘENÉ HODNOTY PRO VÝPOČET KONCENTRACE TZL	41
TABULKA 25 PALIVOVÝ ROZBOR PELET ZE SENA URČENÝCH PRO STANOVENÍ EMISÍ NA KOTLI VERNER A251.1	42
TABULKA 26 PALIVOVÝ ROZBOR PELET Z ŘEPKY URČENÝCH PRO STANOVENÍ EMISÍ NA KOTLI VERNER A251.1	44
TABULKA 27 PALIVOVÝ ROZBOR PELET ZE PŠENICE, URČENÝCH PRO STANOVENÍ EMISÍ NA KOTLI VERNER A251.1	45

TABULKA 28 PALIVOVÝ ROZBOR PELET ZE SEMÍNEK, URČENÝCH PRO STANOVENÍ

EMISÍ NA KOTLI VERNER A251.1	47
TABULKA 29 VÝSLEDNÉ SROVNÁNÍ PALIV	50
TABULKA 30 EMISNÍ LIMITY PRO KOTLE	50

Seznam grafů

GRAF 1 ZÁVISLOST EMISÍ CO, NO _x A KYSLÍKU NA ČASE PRO SENO	42
GRAF 2 ZÁVISLOST TEPLoty SPALIN A VÝKONU NA ČASE PRO SENO	43
GRAF 3 USTÁLENÉ MĚŘENÍ PRO SENO	43
GRAF 4 ZÁVISLOST EMISÍ CO, NO _x A KYSLÍKU NA ČASE PRO ŘEPKU	
GRAF 5 ZÁVISLOST TEPLoty SPALIN A VÝKONU NA ČASE PRO ŘEPKU	44
GRAF 6 USTÁLENÉ MĚŘENÍ PRO ŘEPKU	45
GRAF 7 ZÁVISLOST EMISÍ CO, NO _x A KYSLÍKU NA ČASE PRO PŠENICI	
GRAF 8 ZÁVISLOST TEPLoty SPALIN A VÝKONU NA ČASE PRO PŠENICI	46
GRAF 9 USTÁLENÉ MĚŘENÍ PRO PŠENICI	46
GRAF 10 ZÁVISLOST EMISÍ CO, NO _x A KYSLÍKU NA ČASE PRO SEMÍNKA	
GRAF 11 ZÁVISLOST TEPLoty SPALIN A VÝKONU NA ČASE SEMÍNKA	47
GRAF 12 USTÁLENÉ MĚŘENÍ PRO SEMÍNKA	48
GRAF 13 POROVNÁNÍ NOREF VŠECH PALIV	49
GRAF 14 POROVNÁNÍ COREF VŠECH PALIV	49
GRAF 15 VÝSLEDNÉ POROVNÁNÍ EMISÍ TZL VŠECH PALIV	50